

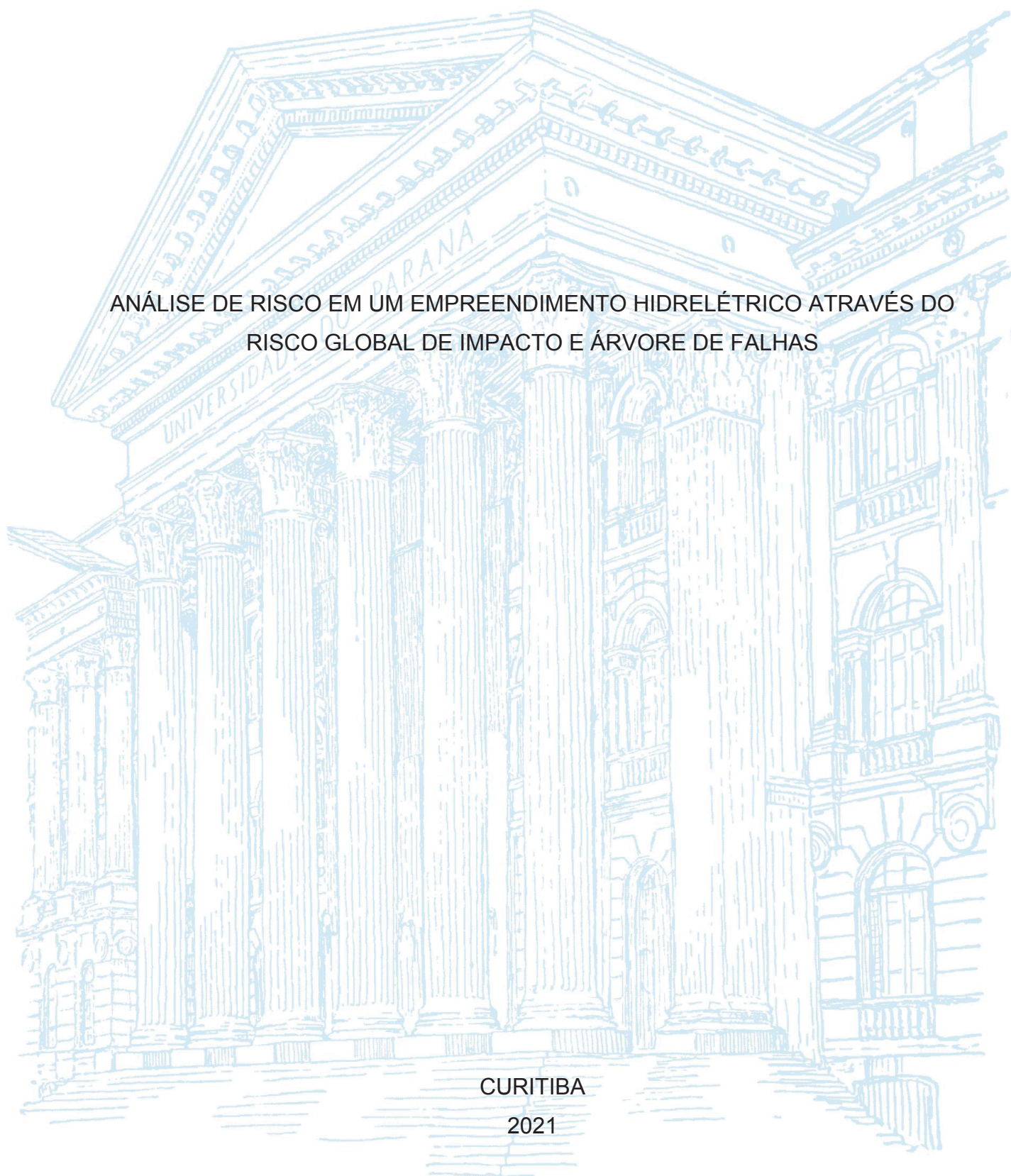
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAOLA DUTRA

ANÁLISE DE RISCO EM UM EMPREENDIMENTO HIDRELÉTRICO ATRAVÉS DO
RISCO GLOBAL DE IMPACTO E ÁRVORE DE FALHAS

CURITIBA

2021



PAOLA DUTRA

ANÁLISE DE RISCO EM UM EMPREENDIMENTO HIDRELÉTRICO ATRAVÉS DO
RISCO GLOBAL DE IMPACTO E ÁRVORE DE FALHAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Área de Concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Teixeira

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

D978a

Dutra, Paola

Análise de risco em um empreendimento hidrelétrico através do risco global de impacto e árvore de falhas [recurso eletrônico]/ Paola Dutra - Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná como quesito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Helder Teixeira

1. Mecânica dos solos. 2. Barragens e açudes - segurança. 3. Análise de riscos ambientais. I. Teixeira, Sidnei Helder. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD 627

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PAOLA DUTRA** intitulada: **ANÁLISE DE RISCO EM UM EMPREENDIMENTO HIDRELÉTRICO ATRAVÉS DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO E ÁRVORE DE FALHAS**, sob orientação do Prof. Dr. SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 18 de Março de 2021.

Assinatura Eletrônica

18/05/2021 15:37:41.0

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/05/2021 16:12:01.0

JOSÉ MARQUES FILHO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

19/05/2021 06:11:13.0

PAULO MÁRCIO FERNANDES VIANA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS)

RESUMO

No Brasil estão cadastradas 21.929 barragens no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, as quais são empregadas para contenção de líquidos e sólidos. Como qualquer obra de engenharia, essas estruturas apresentam riscos envolvidos que podem afetar diretamente o vale a jusante do barramento, causando perdas ambientais, econômicas e impactos na imagem da empresa responsável. As análises de risco são ferramentas úteis para avaliação da segurança de barragens, utilizadas no mapeamento de possíveis falhas ou eventos e seus efeitos, auxiliando engenheiros e empreendedores na tomada de decisões. O estudo realizou análises através de duas abordagens distintas, quais sejam: indutiva e dedutiva. Sendo que uma das análises foi desenvolvida qualitativamente e outra semiquantitativamente. Os métodos avaliados foram o FMEA (Análise de Modo e Efeito das Falhas), LCI (Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas) e FTA (Árvore de Falhas). Através do processo de análise de risco em um estudo de caso foi possível identificar carências e aspectos positivos dos métodos. O resultado deste trabalho foi obtido por meio da proposição de um método de análise de risco, denominado como Risco Global de Impacto, realizado através da modificação e combinação de aspectos do LCI, FMEA e da Política Nacional de Barragens. Adicionalmente, foi realizada a personalização e aplicação do método de Árvore de Falhas em um empreendimento hidrelétrico, motivando engenheiros e responsáveis técnicos na aplicação destes métodos de análise de risco na avaliação da segurança de obras similares.

Palavras-chave: Análise de Risco. Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas. Análise de Modo e Efeito das Falhas. Análise de Árvore de Falhas. Segurança de Barragens.

ABSTRACT

In Brazil are registered 19.338 dams in Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, which are constructed to retain liquids and solids. Dams present risks involved, however these risks can directly affect the valley downstream of the dam, causing environmental and economic losses, and impacts on the image of the responsible company. Risk analyzes are important tools used to analyze dam safety, to map possible failures and their effects, and to assist engineers and entrepreneurs in making decisions. The study carried out analyzes using two different approaches, inductive and deductive. In addition, one analyze was developed qualitatively and the other quantitatively. The evaluated methods were FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), LCI (Location, Cause and Indicator Diagrams) and FTA (Failure Tree Analysis). Through the risk analysis process in a case study it was possible to identify deficiencies and positive aspects of the methods. The result of this work was obtained through the development of a risk analysis method, called Global Impact Risk, carried out by modifying and combining aspects of the LCI, FMEA and the Política Nacional de Barragens. Additionally, it was made the customization and implementation of Fault Tree method in a hydroelectric project, motivating engineers and technicians in the application of these risk analysis methods in the safety assessment of similar works.

Keywords: Risk Analysis. Location, Cause and Indicator Diagrams. Failure Mode and Effect Analysis. Fault Tree Analysis. Dam Safety.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS BRASILEIRAS	12
FIGURA 2.1 – ZONEAMENTO SÍSMICO DO BRASIL	18
FIGURA 2.2 – CRITÉRIO RSA DA ANCOLD.....	23
FIGURA 2.3 – ESTRUTURA DE CONCRETO – LISTA DE ANOMALIAS	29
FIGURA 2.4 – BARRAGEM – ANÁLISE DE FLUTUAÇÃO.....	30
FIGURA 2.5 – BARRAGEM – ANÁLISE DE TOMBAMENTO.....	31
FIGURA 2.6 – BARRAGEM – DESLIZAMENTO – A) INTERFACE CONCRETO E A FUNDAÇÃO, B) PLANOS DE FRAQUEZA, C) ZONAS FRATURADAS	31
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE ANOMALIAS	33
FIGURA 2.8 – EVOLUÇÃO DE UMA BRECHA PROVOCADA POR GALGAMENTO: a) brecha inicial b) brecha intermediária c) colapso total da estrutura	34
FIGURA 2.9 – PARTE DE UM DIAGRAMA LCI PARA UMA BARRAGEM DE ATERRO	42
FIGURA 2.10 – ÁRVORE DE FALHAS – SIMBOLOGIA DE EVENTOS	48
FIGURA 2.11 – EQUIVALÊNCIA DOS OPERADORES LÓGICOS “E” E “OU” COM SISTEMAS EM SÉRIE E EM PARALELO	49
FIGURA 2.12 – ÁRVORE DE FALHAS – MÉTODO DIRETO.....	50
FIGURA 2.13 – REGRAS BÁSICAS DA ÁLGEBRA BOOLEANA.....	53
FIGURA 2.14 – EXEMPLO DE UMA ÁRVORE DE FALHAS.....	53
FIGURA 2.15 – ÁRVORE DE FALHAS – EXEMPLO.....	54
FIGURA 2.16 – ÁRVORE DE FALHAS REVERSA.....	55
FIGURA 2.17 – FORMATO DE UMA PLANILHA FMEA.....	60
FIGURA 2.18 – FORMULÁRIO PARA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA/FMECA	60
FIGURA 2.19 – APLICAÇÃO DA FMEA EM UM SECADOR INDUSTRIAL.....	61
FIGURA 2.20 – LIMITES DOS RISCOS PARA O ÍNDICE DE CRITICIDADE	69
FIGURA 2.21 – MATRIZ DE CRITICIDADE.....	70
FIGURA 2.22 – MATRIZ DE ANÁLISE DE RISCO	70
FIGURA 2.23 – MATRIZ DE ANÁLISE DE RISCO	71
FIGURA 3.1 – MATERIAIS E MÉTODOS – FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS.....	73

FIGURA 3.2 – MÉTODO DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO – ETAPAS DE APLICAÇÃO.....	74
FIGURA 3.3 – MÉTODO DE ÁRVORE DE FALHAS – ETAPAS DE APLICAÇÃO...	80
FIGURA 3.4 – FTA – ITEM SOFTWARE – ÁREA DE TRABALHO	82
FIGURA 4.1 – ARRANJO GERAL ESQUEMÁTICO	85
FIGURA 4.2 – VERTEDOURO – PLANTA.....	85
FIGURA 4.3 – VERTEDOURO – SEÇÃO LONGITUDINAL.....	86
FIGURA 4.4 – EXTRAVASOR/VERTEDOURO – SEÇÃO TRANSVERSAL	86
FIGURA 4.5 – CANAL DE ADUÇÃO – ARRANJO GERAL – PLANTA.....	87
FIGURA 4.6 – CANAL DE ADUÇÃO – SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS	87
FIGURA 4.7 – HIDROGRAMA DAS CHEIAS AFLUENTES.....	89
FIGURA 4.8 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA CONDIÇÃO NATURAL (TR 100 ANOS) E DA CONDIÇÃO COM RUPTURA Q_{MLT}	89
FIGURA 4.9 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA CONDIÇÃO NATURAL (TR 10.000 ANOS) E DA CONDIÇÃO COM RUPTURA (TR 10.000 ANOS)	90
FIGURA 4.10 – CARACTERIZAÇÃO DO VALE A JUSANTE – ÁREAS AFETADAS	91
FIGURA 4.11 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 01 – INSTABILIDADE DE TALUDE	116
FIGURA 4.12 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 01 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – INSTABILIDADE DE TALUDE	117
FIGURA 4.13 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 02 – GALGAMENTO	118
FIGURA 4.14 – CANAL DE ADUÇÃO – GALGAMENTO – ÁRVORE DE FALHAS 02 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA	119
FIGURA 4.15 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 03 – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA	120
FIGURA 4.16 – VERTEDOURO – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA	121
FIGURA 4.17 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 04 – GALGAMENTO....	121
FIGURA 4.18 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 04 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – GALGAMENTO	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – RUPTURAS DE BARRAGENS.....	14
TABELA 2.1 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	26
TABELA 2.2 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – ESTADO DE CONSERVAÇÃO.....	27
TABELA 2.3 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM	28
TABELA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO NÚMERO DE PESSOAS EM PERIGO	39
TABELA 2.5 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AS PERDAS ECONÔMICAS	40
TABELA 2.6 – ÍNDICE DE ORDENAÇÃO, CRITICIDADE, CONFIANÇA E RISCO (ENSECADEIRA DE ODELAUCA)	44
TABELA 2.7 – ÍNDICE GLOBAL DE IMPACTO	45
TABELA 2.8 - ÁRVORE DE FALHAS - EVENTOS	47
TABELA 2.9 - ÁRVORE DE FALHAS - OPERADORES LÓGICOS.....	50
TABELA 2.10 - ÁRVORE DE FALHAS – SIMBOLOGIA DOS ELEMENTOS DE TRANSFERÊNCIA.....	51
TABELA 2.11 – CLASSES DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	62
TABELA 2.12 – ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA.....	63
TABELA 2.13 – CLASSIFICAÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE UM MODO DE FALHA	63
TABELA 2.14 – CLASSES DE SEVERIDADE	64
TABELA 2.15 – CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE DE UM MODO DE FALHA...	64
TABELA 2.16 – DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE.....	65
TABELA 2.17 – AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO.....	66
TABELA 2.18 – ÍNDICE DE DETECÇÃO.....	67
TABELA 2.19 – ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA.....	67
TABELA 2.20 – ÍNDICE DE SEVERIDADE.....	68
TABELA 4.1 – TEMPO DE RECORRÊNCIA E PICO DA CHEIA AFLUENTE	88
TABELA 4.2 – CLASSES DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	92
TABELA 4.3 – CLASSES DE SEVERIDADE	93
TABELA 4.4 – CLASSES DE DETECÇÃO	94

TABELA 4.5 – ÍNDICE DE CATEGORIA DE RISCO	95
TABELA 4.6 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS HUMANAS E PERDAS ECONÔMICAS	96
TABELA 4.7 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AS PERDAS ECONÔMICAS	97
TABELA 4.8 – CANAL DE ADUÇÃO – DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE RISCO.....	98
TABELA 4.9 – VERTEDOURO – DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE RISCO	102
TABELA 4.10 – CLASSIFICAÇÃO DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO	105
TABELA 4.11 – ANÁLISE DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO DO EMPREENDIMENTO	105
TABELA 4.12 – SIMBOLOGIA ASSOCIADA A EVENTOS PRIMÁRIOS	107
TABELA 4.13 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA.....	108
TABELA 4.14 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE 01 – INSTABILIDADE DE TALUDE – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS	109
TABELA 4.15 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE 02 - GALGAMENTO - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS	110
TABELA 4.16 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 03 – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS	112
TABELA 4.17 – VERTEDOURO/PONTE – GALGAMENTO – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS	114
TABELA 4.18 - SIMBOLOGIA DE OPERADORES LÓGICOS E ELEMENTOS DE TRANSFERÊNCIA.....	115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO.....	16
1.2.1 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 RISCO	17
2.2 PROBABILIDADE	20
2.3 CONFIABILIDADE	21
2.4 FALHA.....	21
2.5 CONSEQUÊNCIA	22
2.6 MITIGAÇÃO	23
2.7 POLÍTICA NACIONAL DE BARRAGENS	23
2.8 ESTRUTURAS DE CONCRETO – ESTADO LIMITE E ANOMALIAS	29
2.8.1 Flutuação.....	30
2.8.2 Tombamento	30
2.8.3 Deslizamento.....	31
2.8.4 Tensões admissíveis	32
2.8.5 Galgamento	32
2.9 ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS – ESTADO LIMITE E ANOMALIAS.....	33
2.9.1 Galgamento.....	34
2.9.2 Instabilidade de taludes.....	35
2.10 ANÁLISE DE RISCO	35
2.10.1 Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI)	37
2.10.1.1 Etapa 1 – Análise das Consequências	39
2.10.1.2 Etapa 2 – Diagrama LCI	41
2.11 ÁRVORE DE FALHAS (FTA)	45
2.11.1 Eventos	47
2.11.2 Portas Lógicas / Operadores Lógicos.....	48
2.11.3 Elementos de Transferência.....	51
2.11.4 Construção e Análise dos Resultados.....	51
2.12 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA)	56
2.12.1 Classes de Probabilidade de Ocorrência	62

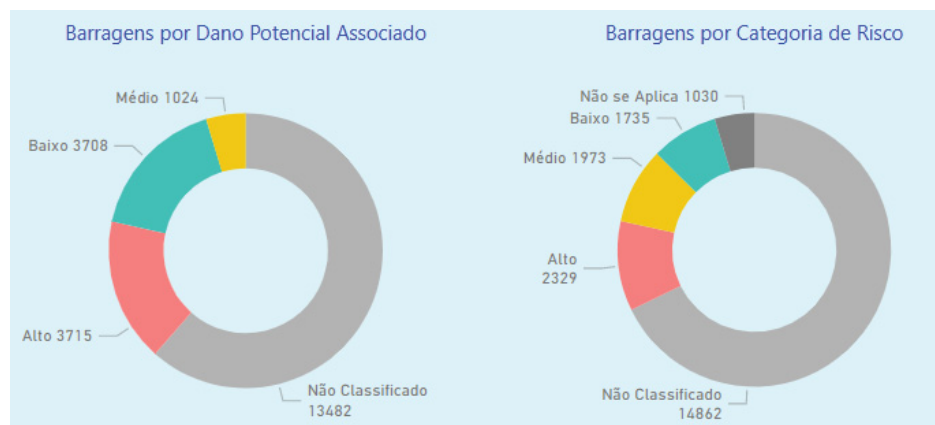
2.12.2 Classes de Severidade.....	63
2.12.3 Classes de Probabilidade de Detecção.....	66
2.12.4 Estimativa de Risco.....	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1 ANÁLISE DE RISCO – RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI)	74
3.2 ANÁLISE DE RISCO – ÁRVORE DE FALHAS	79
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	84
4.1 RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI).....	84
4.1.1 Etapa 1 – Determinação do Objetivo.....	84
4.1.2 Etapa 2 – Definição da Equipe	84
4.1.3 Etapa 3 – Caracterização das Estruturas	84
4.1.4 Etapa 4 – Caracterização do Vale a Jusante	88
4.1.5 Etapa 5 – Desenvolvimento e Aplicação do Método	91
4.1.6 Resultado do Risco Global de Impacto	104
4.2 ANÁLISE DE RISCO – ÁRVORE DE FALHAS (FTA).....	106
4.2.1 Etapa 4 - Definição dos Eventos de Topo	107
4.2.2 Etapa 5 – Definição dos Eventos Primários ou Causas Iniciadoras	107
4.2.3 Etapa 6 – Desenvolvimento e Análise do Método	114
4.2.4 Etapa 7 – Resultado da Árvore de Falhas.....	122
5 CONCLUSÕES	124
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

Barragens são obras utilizadas para abastecimento de água, geração de energia, irrigação, contenção de rejeitos de minério, contenção de cheias, entre outras utilidades para a sociedade. Esse tipo de obra da engenharia é empregado para contenção de líquidos e sólidos e, como qualquer estrutura, apresenta riscos envolvidos em sua concepção, execução e operação. O risco envolvido pode afetar diretamente a população a jusante do empreendimento e, além disso, pode gerar perdas ambientais, econômicas e impactos na imagem pública da empresa responsável.

No Brasil existem 3.715 barragens classificadas por Dano Potencial Associado (DPA) alto e 2.329 por Categoria de Risco (CRI) alta, conforme é possível analisar na FIGURA 1.1. No ano de 2019, foram relatados 12 acidentes e 58 incidentes com barragens em 15 estados brasileiros. Também houve um aumento na quantidade de barragens que preocupam os órgãos fiscalizadores – 26 órgãos listaram um total de 156 barragens críticas em 22 estados. A verificação *in loco*, do estado de conservação, é o método mais utilizado pelos fiscalizadores na determinação desta listagem (RSB, 2019).

FIGURA 1.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS BRASILEIRAS



FONTE: Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (2021).

Nos projetos de barragens, os riscos envolvidos em uma possível ruptura devem ser mínimos e a segurança deve ser máxima. Portanto, as questões relacionadas aos riscos que são considerados aceitáveis ou não aos empreendimentos são normalmente discutidas (PEREIRA, 2020).

A gestão da segurança de barragens é uma questão de controle de riscos e tomada de decisões sob condições de incertezas. Estas incertezas são intrínsecas aos processos de engenharia e não as reconhecer reflete na confiabilidade dos resultados obtidos (FUSARO, 2011).

Este trabalho apresenta a aplicação e proposição de métodos de análise de risco, modificando, combinando e personalizando os métodos através de aspectos positivos e negativos identificados durante o processo, com o objetivo de motivar engenheiros e responsáveis técnicos na utilização destes para avaliação da segurança de empreendimento similares.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os benefícios de uma barragem atingem grande parte da população, na forma de abastecimento de água, irrigação, produção de energia elétrica, regularização de vazões, disposição de rejeitos de mineração, acumulação de resíduos industriais, navegação, aquicultura e recreação (RSB, 2019). Apesar destes benefícios, as barragens com seus reservatórios têm potencial risco de ruptura, que podem gerar danos às populações, ao meio ambiente e à economia. Estes danos muitas vezes são potencializados quando várias barragens são atingidas por rompimentos em cascata (RSB, 2019).

A segurança de barragens é um aspecto fundamental para autoridades legais, empreendedores e para os agentes que dão apoio técnico nas atividades, relativas à concepção, ao projeto, à construção, à operação e ao descomissionamento, as quais devem ser proporcionais ao tipo, dimensão e risco envolvido (ANA, 2016).

Uma barragem, ao longo de sua vida útil, pode ser afetada por diversos fenômenos, como cheias excepcionais, mudanças climáticas, galgamentos, terremotos, deslizamentos de taludes, deterioração do material constituinte, entre outros fenômenos com capacidade de conduzir a incidentes ou acidentes. Por esse motivo, o conhecimento e o controle de riscos são importantes em projetos de barragens (PEREIRA, 2020).

Apresenta-se na TABELA 1.1 um estudo de Pereira (2020), realizado sobre acidentes e ruptura de barragens pelo mundo.

TABELA 1.1 – RUPTURAS DE BARRAGENS

BARRAGEM	PAÍS	TIPO DE BARRAGEM	TÉRMINO	RUPTURA	VÍTIMAS	CAUSA
Barragem de Orós	Brasil	T/E	1960	1960	1.000	G
Euclides da Cunha	Brasil	T	1960	1977	0	G
El Guapo	Venezuela	T	1978	1999	-	G
Banqiao	China	T	1952	1975	>26.000	G
Glashutte	Alemanha	T	1953	2002	0	G
Canyon Lake	EUA	T	1938	1972	242	G
Khadakwasla	Índia	AL	1879	1961	>1.000	G
Babi Yar	Ucrânia	T	1950	1961	145	G
Frías	Argentina	E	1940	1970	102	G
Lower Otay	EUA	E	1897	1916	30	G
Whitewater	EUA	T	1943	1972	0	G
South Fork	EUA	T/E	1839	1889	2.209	G
Laurel Run	EUA	T	1919	1977	70	G
Walnut Grove	EUA	E	-	1890	150	G
Sempor	Indonésia	E	1967	1967	200	G
Eigiau Coedty	Reino Unido	G	1913	1925	16	P G
Situ Gintung	Indonésia	T	1933	2009	100	G
Ka Loko	Havaí	T	1890 1911	2006	7	G
Twentyone	EUA	T	Anos 90	2017	0	G
Limoeiro	Brasil	T	1960	1977	0	G
Panshet	Índia	T	1961	1961	>1.000	G
Machhu II	Índia	AL/T	1972	1979	>1.300	G
Pampulha	Brasil	TFC	1943	1954	0	P
Teton	EUA	T	1975	1976	11	P
Fontenelle	EUA	T	1964	1965	0	P
Nanaksagar	Índia	T	1962	1967	100	P
St. Francis	EUA	G	1926	1928	450	F
Baldwin Hills	EUA	E	1951	1963	0	F
Austin	EUA	G	1910	1911	80	F
Walter Bouldin	EUA	T	1967	1975	0	P
Malpasset	França	Arco	1954	1959	421	F
Bila Desna	República Tcheca	T	1915	1916	65	P
Barragem de Camará	Brasil	CCR	2002	2004	4	F
Big Bay	EUA	T	1991	2004	0	P
Lawn Lake	EUA	T	1903	1982	0	P
Meadow Pond	EUA	-	1994	1996	1	P
Inxú	Brasil	T	2015	2016	3	P
Espora	Brasil	T	2006	2008	0	CE
Apertadinho	Brasil	T	2006	2008	0	P
Alla Sella Zerbino	Itália	G	1923	1935	100	CE
Gleno	Itália	Arco	1923	1923	600	CE
Bouzey	França	AL	1881	1895	150	CE
Barragem El Habra	Argélia	AL	1872	1881	209	CE
Vega de Tera	Espanha	CF	1957	1959	144	CE
Tighra	Índia	AL	1913	1917	>1.000	E
Algodões I	Brasil	T	2004	2009	9	E

BARRAGEM	PAÍS	TIPO DE BARRAGEM	TÉRMINO	RUPTURA	VÍTIMAS	CAUSA
Barragem de Vajont	Itália	Arco	1960	1963	2.600	DT

Legenda: AL – Alvenaria; T/E – Terra e Enrocamento; T – Terra; E – Enrocamento; TFC – Terra com Face de Concreto; CF – Contraforte; CCR – Concreto Compactado com Rolo; G – Concreto à gravidade; CE – Colapso estrutural; G – Galgamento; P – Piping; F – Fundação; E – Erosão Externa; DT – Desmoronamento de terra.

FONTE: Pereira (2020).

Atualmente, no Brasil, estão cadastradas no SNISB (Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens) 21.929 barragens, sendo que 65% das barragens cadastradas (14.199) não possuem informações suficientes para constatar se elas se submetem ou não à PNSB (Política Nacional de Segurança de Barragens), mostrando que ainda há um enorme passivo de informações básicas das barragens para verificação e análise (SNISB, 2021).

Em relação às barragens submetidas à Política Nacional de Segurança de Barragens, é possível constatar que: 50% dessas estruturas possuem altura maior que 15 metros, 47% possuem capacidade de reservatório superior a 3.000.000 m³ e 56% foram construídas em solo compactado (RSB, 2019).

O número de barragens no Brasil é expressivo e há existência de uma probabilidade de ruptura e do alto impacto que este evento teria a jusante. A questão que deve ser discutida é como este risco pode ser reduzido (FUSARO, 2011).

As análises de riscos são ferramentas para a segurança de barragens, utilizadas no mapeamento de possíveis falhas e suas consequências, auxiliando engenheiros e empreendedores na tomada de decisões quanto ações mitigadoras que podem ser implementadas, de forma a reduzir riscos, aumentar a probabilidade de detecção de falhas e/ou eventos e, conseqüentemente, aumentar a segurança do empreendimento.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral da presente pesquisa é realizar a combinação, personalização, proposição e adaptação de métodos de análise de risco, de forma a motivar engenheiros e responsáveis técnicos na utilização destes para avaliação da segurança de empreendimentos similares.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão da literatura técnica relacionada aos métodos de análise de risco, de modo permitir a escolha dos métodos analisados e aplicados ao estudo de caso;
- Realizar aplicação e análise crítica dos métodos FMEA, LCI e FTA em um empreendimento hidrelétrico;
- Propor melhorias e combinações dos métodos de análise de risco, baseadas na análise crítica executada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica da pesquisa, com a definição de aspectos utilizados em análises de risco, informações relativas a Política Nacional de Barragens, principais anomalias e estado limite último de estruturas de concreto e estruturas geotécnicas.

2.1 RISCO

No passado era comum que o risco fosse considerado apenas como um conceito negativo que a organização evitaria ou transferiria para outras pessoas. Atualmente é conhecido como um fato inerente e evitá-lo completamente é renunciar a oportunidade de conquistar objetivos (ISO 31000, 2010).

A ISO 31000 (2010) relaciona o risco com a possibilidade de um efeito e, em particular, um efeito sobre os objetivos. Quando o risco é definido desta maneira revela claramente que o gerenciamento de risco é um processo de otimização que torna a realização de um objetivo mais provável.

Segundo Almeida (2014), risco é uma combinação entre conhecimento e desconhecimento (incerteza), é uma incerteza de uma atividade e da severidade de suas consequências. Do dicionário Houaiss da língua portuguesa, risco pode ser definido como *“probabilidade de insucesso de determinado empreendimento, em função de acontecimento eventual, incerto, cuja ocorrência não depende exclusivamente da vontade dos interessados”*.

As estruturas estão sujeitas a solicitações/carregamentos (carregamentos normais, excepcionais e de construção) considerados nos estudos de estabilidade global e respectivos cálculos de esforços internos. A segurança global ou resposta de uma estrutura é garantida pelo atendimento das condições/carregamentos para os estados limites últimos e de utilização (ELETROBRÁS, 2003).

Os principais riscos envolvidos em projetos relacionados à engenharia de barragens, de acordo com Fusaro (2011), são apresentados na sequência:

a) RISCO HIDROLÓGICO

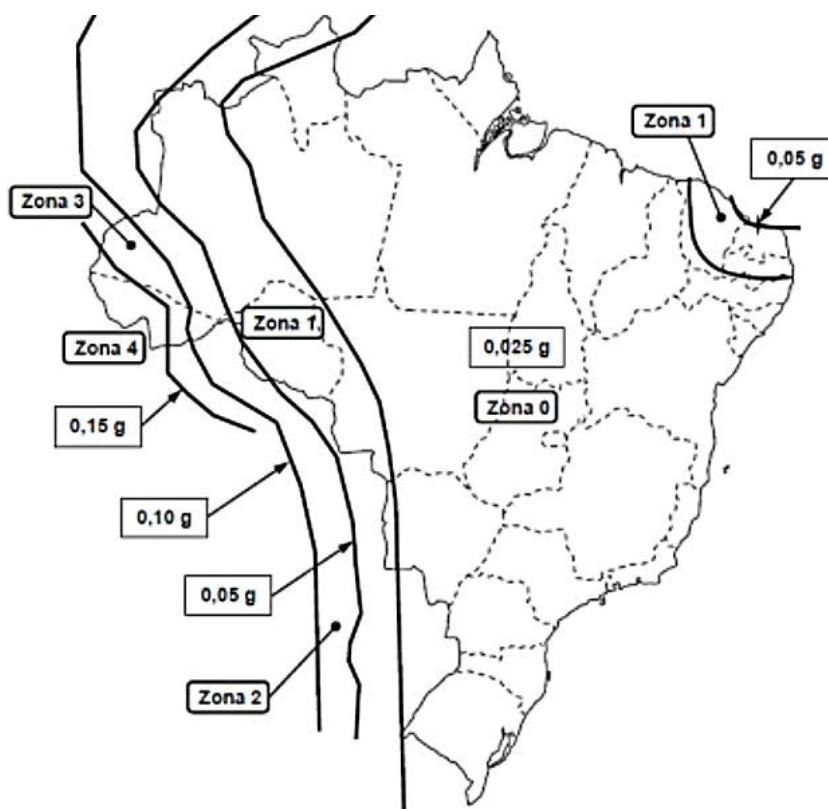
É a probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de vazão superior àquela para a qual foi dimensionada (FUSARO, 2011).

Para barragens com altura superior a 30 m, cujo colapso envolva risco de perdas de vidas humanas, a vazão de projeto dos órgãos extravasores, ou cheia de projeto, será a cheia máxima provável. Para barragens de altura inferior a 30 m ou com reservatório de volume menor que 50.000.000 m³ e, não havendo risco de perdas de vidas humanas, a cheia de projeto será definida através de uma análise de risco, respeitada a recorrência mínima de 1.000 anos (ELETROBRÁS, 2003).

b) RISCO SISMOLÓGICO

No Brasil, desde 2006 está em vigor a NBR 15421 – Projetos de estruturas resistentes a sismo – que define cinco zonas sísmicas considerando a variação da aceleração sísmica horizontal, conforme é possível observar na FIGURA 2.1.

FIGURA 2.1 – ZONEAMENTO SÍSMICO DO BRASIL



FONTE: ABNT NBR 15421 (2006)

c) ESCORREGAMENTO DE MASSA

Escorregamentos de taludes em reservatórios ou canais, movimentando um volume expressivo de solo e/ou rocha, podem causar ondas significativas e galgamento da estrutura.

d) AÇÕES AGRESSIVAS

Atuação de intempéries (chuva, vento, mudanças climáticas) sobre as barragens e estruturas associadas podem causar, ao longo do tempo, envelhecimento, erosão, corrosão, entre outros fenômenos térmicos, mecânicos e químicos que causam deterioração dos materiais constituintes.

e) RISCOS NA OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO

Além dos riscos hidrológicos, existem fatores determinados pelo reservatório e órgãos extravasores que impõem riscos adicionais à segurança. Regras operativas adequadas e manutenção dos dispositivos extravasores são fundamentais, afinal, o mau funcionamento (falta de energia, obstruções, falha mecânica/elétrica de comportas, manutenção deficiente) coloca em risco os investimentos feitos no cálculo de cheias e construção de órgãos extravasores.

f) RISCOS GEOLÓGICOS

Há duas componentes do risco geológico, sendo a primeira relacionada à ocorrência de fenômenos geológicos naturais que podem ameaçar um projeto, semelhante ao risco que afeta encostas, e a segunda relacionada à probabilidade da geologia efetivamente encontrada na obra se afastar das condições inicialmente previstas.

g) RISCOS ESTRUTURAIS

São relacionados ao dimensionamento estrutural e geotécnico, que podem levar a falha de estruturas do barramento na resposta aos carregamentos a elas impostas.

h) RISCOS ASSOCIADOS AO MONITORAMENTO

São riscos relativos ao controle permanente do comportamento das estruturas por meio de atividades de auscultação de barragens, ou seja, inspeções visuais e análise dos dados da instrumentação instalada.

i) RISCOS TÉCNICO-ORGANIZACIONAIS

Riscos associados à gestão dos riscos pelas empresas de projeto, construção e operação dos empreendimentos. Considerando que a gestão de riscos engloba

identificação, análise, apreciação, tratamento e monitoramento dos riscos, o estabelecimento de processos organizacionais que permitam esta gestão é de suma importância.

j) RISCOS ASSOCIADOS A GESTÃO DE EMERGÊNCIAS

São riscos relativos às respostas de emergência para se evitar uma ruptura, ou se esta for inevitável, reduzir as consequências. Neste caso, citam-se: elaboração de Plano de Ação de Emergência (PAE), resposta à falha no planejamento das ações de resposta, à falha nos sistemas de comunicação e/ou à falta de mapas de zoneamento de riscos.

k) RISCOS DE RUPTURA DE BARRAGENS EM CASCATA

São causados pela possibilidade de ruptura de uma barragem, causando uma onda de cheia e galgamento de barragens a jusante, podendo ocasionar à ruptura destas.

2.2 PROBABILIDADE

Em análises de risco em barragens, a probabilidade pode ser definida de duas formas em função da incerteza a que se refere. Pode ser definida como probabilidade objetiva, relacionada à frequência de eventos que ocorrem aleatoriamente, e a probabilidade subjetiva, relacionada ao grau de confiança do estudo – baseada nas informações disponíveis (SPANCOLD, 2013).

Na área da engenharia de barragens é comum utilizar a probabilidade de ocorrência através do conceito de período de retorno, normalmente em anos, que significa que um evento com período de retorno “T” é provável de acontecer ou ser excedido uma vez em “T” anos (SANTOS, 2006).

A probabilidade de ocorrer um evento de grandeza igual ou superior ao com período de retorno “T”, durante um período de “N” anos, é dado pela Equação (1) (ELETROBRÁS, 2003):

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (1)$$

2.3 CONFIABILIDADE

De acordo com Scapin (2013), confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema executar sua função de maneira satisfatória. O fator de probabilidade está relacionado ao número de vezes que o sistema opera adequadamente. Uma probabilidade de 95% significa que o sistema opera adequadamente 95 vezes das 100 vezes que executou sua função.

Segundo a norma britânica BS 4778-3.1:1991, confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas em um período determinado.

A aplicação dos requisitos de confiabilidade em um sistema requer uma análise quantitativa, na maioria das vezes, definindo-se sua probabilidade de operação. Sendo que a função básica da confiabilidade pode ser descrita como $R = 1 - F$, em que R é a confiabilidade do sistema e F é a probabilidade de o sistema falhar em um instante qualquer (SCAPIN, 2013).

A confiabilidade é definida como um processo de estimar quantitativamente a probabilidade de falha de um sistema. A confiabilidade de um sistema complexo depende da confiabilidade de cada componente (SCAPIN, 2013).

Segundo Scapin (2013), sistemas paralelos executam a mesma função no mesmo intervalo de tempo, porém, para que haja falha total do sistema é necessário que todos os componentes do sistema falhem. A probabilidade de falha simultânea é o produto da probabilidade de cada componente.

2.4 FALHA

Falha pode ser caracterizada pela incapacidade de uma estrutura ou equipamento de executar sua função, dentro dos padrões projetados de desempenho (COLLE, 2008).

No contexto da análise de riscos, o conceito falha não se limita apenas a instabilidade global do empreendimento, mas a qualquer fator que gere consequências negativas. Segundo o SPANCOLD (2013), a probabilidade de falha pode ser definida como mostrado na Equação (2):

$$P(f) = \sum p(c) \times p(f,c) \quad (2)$$

Onde:

$p(c)$ = Carregamentos ou solicitações;

$p(f,c)$ = Resposta do sistema.

Em uma análise de risco, um empreendimento pode falhar de maneiras diferentes, cada falha é analisada individualmente. Portanto, a probabilidade total de uma falha é a soma das probabilidades de cada modo de falha (SPANCOLD, 2013).

2.5 CONSEQUÊNCIA

Consequência é considerada como um efeito ou resultado de algum fenômeno. Relacionada à engenharia de barragens pode ser o resultado de uma falha ocorrer, sendo que as consequências/efeitos podem envolver impacto em vidas humanas, perdas econômicas, perda de imagem e impactos ambientais.

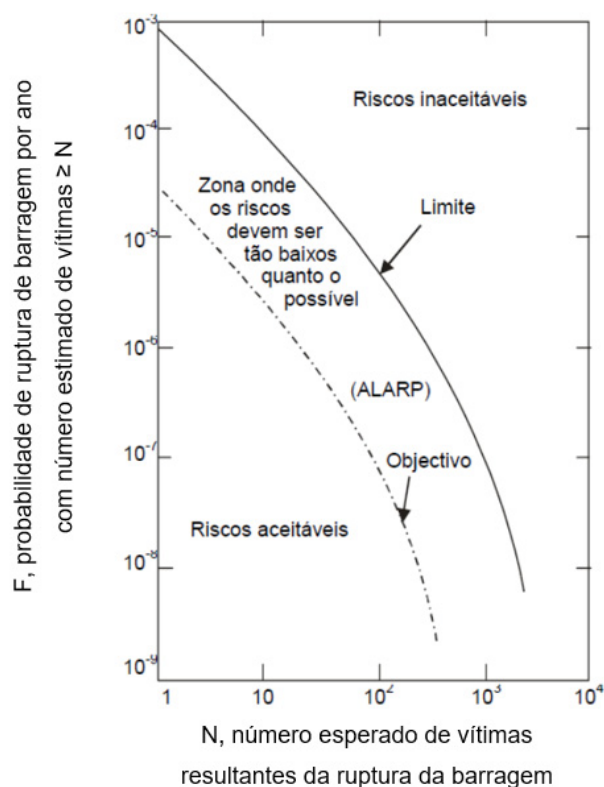
As consequências relacionadas às vidas humanas se referem aos impactos que a falha de um empreendimento pode causar à população. Podem envolver número de feridos e, em um pior cenário, perda de vidas (SPANCOLD, 2013).

As perdas econômicas podem estar relacionadas ao empreendimento em si, portanto na perda de geração de energia e ações corretivas necessárias, mas também podem ser relacionadas ao impacto a jusante, zonas urbanas, agrícolas, industriais, rodovias e meio ambiente atingido (SPANCOLD, 2013).

Os impactos ambientais podem ser caracterizados por alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, afetando a biota e a qualidade dos recursos ambientais (MACHADO, 2007).

Para o caso de acidentes, utilizam-se frequentemente critérios baseados nas curvas F-N (frequência-número), que relaciona frequência acumulada com a consequência ou número de vítimas. Normalmente a curva apresenta três faixas de variação, sendo zona de risco aceitável, zona de risco tolerável e zona de risco intolerável. A Comissão Australiana de Grandes Barragens (ANCOLD) aplica o princípio da curva F-N que relaciona o número de vítimas de uma ruptura de barragem e a frequência de ruptura de barragem por ano com vítimas, conforme é possível observar na FIGURA 2.2 (SILVA, 2012).

FIGURA 2.2 – CRITÉRIO RSA DA ANCOLD



FONTE: SILVA (2012).

2.6 MITIGAÇÃO

As medidas de mitigação de riscos consistem na aplicação seletiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para atenuar a probabilidade de ocorrência ou a severidade de suas consequências. Não é possível a eliminação completa dos riscos relacionados às obras de engenharia, por esse motivo, algumas decisões associadas às ações de riscos podem ser tomadas, como evitar, reduzir, retirar, transferir ou aceitar os riscos (SANTOS, 2006).

2.7 POLÍTICA NACIONAL DE BARRAGENS

Segundo o Ofício nº 207/2017/AA-ANA, a ANA (Agência Nacional de Águas) é responsável pela fiscalização das barragens de usos múltiplos que ela tenha outorgado o direito de uso dos recursos hídricos, exceto para aproveitamento energético, cujo órgão responsável é a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, atualizada pela Lei 14066 de 2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I – Altura do maciço maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- II – Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- III – Reservatório que contenha resíduos perigosos;
- IV – Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas;
- V – Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

O Art. 2º da Lei nº 12.334 indica definições importantes para o entendimento da normativa (definições aplicáveis às análises de riscos de empreendimentos hidrelétricos também), sendo algumas destas apresentadas na sequência (mantendo a numeração indicada na Lei):

II – Reservatório: acumulação não natural de água, substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos;

III – Segurança de barragem: condição que vise manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;

IV – Empreendedor: pessoa física ou jurídica que detenha a outorga, licença, registro, concessão, autorização ou outro ato que lhe confira direito de operação da barragem e do respectivo reservatório;

VI – Gestão de risco: ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas de prevenção, controle e mitigação de riscos;

VII – Dano potencial associado: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem. Graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais;

VIII – Categoria de risco: classificação da barragem de acordo com aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de um acidente ou desastre;

XI – Mapa de inundação: produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica das áreas potencialmente afetadas por um eventual

vazamento ou ruptura da barragem, que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por essa situação;

XII – Acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo do reservatório;

XIII – Incidente: ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura anexa que, se não controlada, pode causar um acidente;

XV – Desastre: resultado de evento adverso que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais.

Os principais objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens são garantir padrões de segurança das barragens, regulamentar as ações de segurança, promover o monitoramento e acompanhamento das ações de segurança, criar condições para ampliação do controle de segurança de barragens pelo poder público, reunir informações para o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos, estabelecer conformidades que permitam avaliação da adequação aos parâmetros, fomentar a cultura de segurança e gestão de riscos e definir procedimentos emergenciais em caso de incidente, acidente ou desastre (Lei nº 12.334, 2010).

As barragens são classificadas por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 12.334, 2010).

A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo é feita em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (Lei nº 12.334, 2010).

A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (Lei nº 12.334, 2010).

A resolução normativa N° 696 (2015) estabelece os critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL, de acordo com a Lei nº 12.334, cujas matrizes utilizadas para a classificação dos empreendimentos, quanto à Categoria de Risco, são apresentadas na sequência.

TABELA 2.1 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)
Altura ≤ 15m (0)	comprimento ≤ 200m (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)
30m ≤ Altura ≤ 60m (2)	-	Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada -sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)
-	-	-	Solo residual / aluvião (5)	-	-

FONTE: ANEEL (2015).

TABELA 2.2 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (g)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (h)	Percolação (i)	Deformações e Recalques (j)	Deterioração dos Taludes / Parâmetros (k)	Eclusa (*) (l)
Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)
Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)	- (8)	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)

FONTE: ANEEL (2015).

TABELA 2.3 – MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO – PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM

Existência de documentação de projeto (n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	-	Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	-	-
inexiste documentação de projeto (8)	-	-	-	-

FONTE: ANEEL (2015).

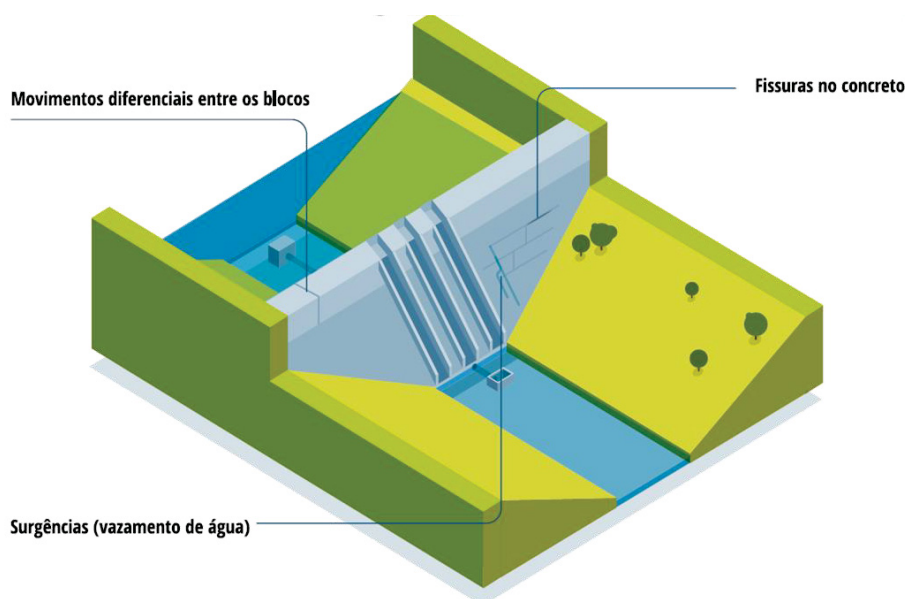
2.8 ESTRUTURAS DE CONCRETO – ESTADO LIMITE E ANOMALIAS

Segundo a Eletrobrás (2003), a segurança das obras de concreto é conceituada pelos princípios estabelecidos na norma brasileira ABNT NBR 8681/2004 – Ações e segurança das estruturas. Para a garantia da segurança global da estrutura deverão ser verificadas e atendidas as condições prescritas na referida norma, para os estados limites últimos e de utilização. Portanto, o não atendimento das condições de segurança estabelecidas em norma poderão caracterizar falha da estrutura.

Em projetos de barragens de concreto as verificações, relacionadas ao estado limite último, correspondem a análises associadas a movimentos de um corpo rígido, como deslizamento, tombamento e flutuação. As verificações, relacionadas ao estado limite de serviço, devem ser efetuadas através de análises de tensões e deformações, que deverão ser elaboradas para todos os elementos estruturais e de fundações (ELETROBRÁS, 2003).

As principais anomalias (modos de falhas) em estruturas de concreto, que podem ser progressivas e ocasionar o estado limite último, são abertura de juntas, deslocamentos diferenciais, fissuras e trincas, infiltrações pela estrutura, infiltrações pela fundação/ombreira, erosão progressiva pela fundação/ombreira, lixiviação, cavitação, entre outros (ANA, 2016). A FIGURA 2.3 apresenta uma lista com as anomalias que a ANA (2016) considera relevantes.

FIGURA 2.3 – ESTRUTURA DE CONCRETO – LISTA DE ANOMALIAS



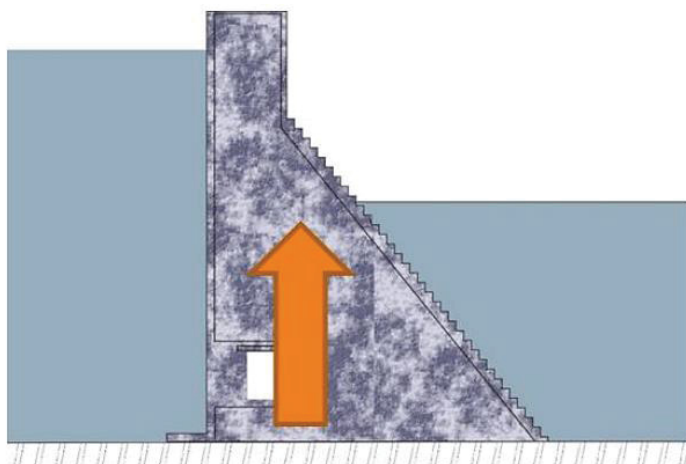
FONTE: RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM (2019).

Na sequência são apresentados os principais estados limites últimos em estruturas de concreto.

2.8.1 Flutuação

A flutuação ocorre quando o somatório de forças de subpressão é muito maior que o somatório das forças gravitacionais. Para análise da flutuação não são consideradas contribuições favoráveis devidas à coesão e ao atrito entre blocos ou entre a estrutura e a fundação. Para as forças verticais deverão ser incluídas as cargas permanentes mínimas das estruturas, como peso próprio de equipamentos permanentes e sistemas de ancoragem. As cargas acidentais não são incluídas na análise de estabilidade (ELETROBRÁS, 2003). A FIGURA 2.4 apresenta um exemplo teórico de flutuação, onde os níveis de montante e jusante são elevados.

FIGURA 2.4 – BARRAGEM – ANÁLISE DE FLUTUAÇÃO



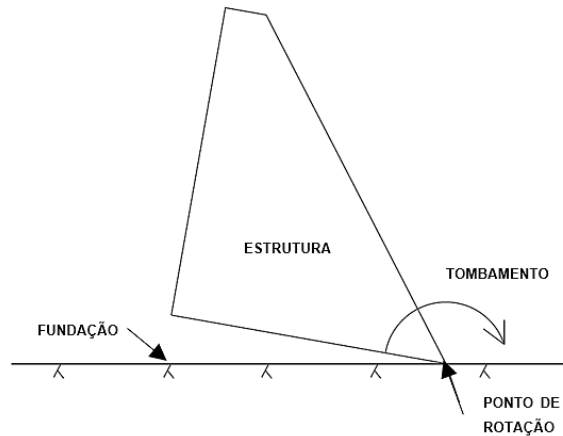
FONTE: KETZER, B. E SCHÄFFER, A. (2010).

2.8.2 Tombamento

O tombamento de uma estrutura ocorre quando as forças instabilizantes, como pressão hidrostática, subpressão e empuxos de terra, são muito maiores que as forças estabilizantes, relacionadas ao peso próprio da estrutura, às cargas permanentes e ao peso próprio dos equipamentos, ocasionando a rotação da estrutura (ELETROBRÁS, 2003), conforme é possível observar na FIGURA 2.5.

De modo reduzir a possibilidade de tombamento, a resultante das forças deve estar localizada no meio terço da área da base, de forma garantir que toda a base da estrutura esteja sob compressão (BROBERG E THORWID, 2015).

FIGURA 2.5 – BARRAGEM – ANÁLISE DE TOMBAMENTO

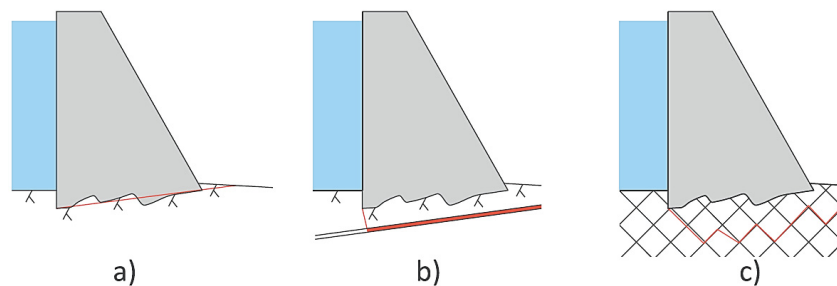


FONTE: Adaptado de Broberg e Thorwid (2015).

2.8.3 Deslizamento

O deslizamento ocorre quando as forças horizontais excedem a resistência de atrito entre a estrutura de concreto e o maciço de fundação. O deslizamento também pode ocorrer quando há falha na interface entre o concreto e a fundação, em planos de fraqueza (falhas/fissuras) e/ou zonas fraturadas da fundação (BROBERG E THORWID, 2015).

FIGURA 2.6 – BARRAGEM – DESLIZAMENTO – A) INTERFACE CONCRETO E A FUNDAÇÃO, B) PLANOS DE FRAQUEZA, C) ZONAS FRATURADAS



FONTE: Broberg e Thorwid (2015).

Segundo Broberg e Thorwid (2015), existem diversas referências sobre coesão entre o concreto e a fundação, contabilizada na estabilidade ao deslizamento.

No entanto, é muito difícil a quantificação deste parâmetro através de sondagens e ensaios. Fatores de segurança mais altos podem ser empregados se a coesão for incluída nos cálculos de estabilidade ao deslizamento. Se a coesão não for considerada, pode ser um aspecto muito conservador, resultando em estruturas com custos maiores que os usuais e inviáveis economicamente.

Segundo a Eletrobrás (2003), as análises relacionadas ao deslizamento podem incluir coesão na resistência ao cisalhamento de materiais rochosos, ou no contato concreto-rocha, a menos que as investigações ou condições existentes em campo indiquem o contrário.

A falha na interface entre a fundação e a estrutura de concreto é analisada em projetos de barragens, embora a falha na fundação possa também ocorrer em planos de fraqueza, como falhas geológicas ou zonas fraturadas em profundidade (BROBERG E THORWID, 2015).

2.8.4 Tensões admissíveis

O estado limite último, relacionado a tensões e deformações, ocorre quando há ruptura estrutural, tensões máximas localizadas, deformações estruturais e/ou ressonância destrutiva entre frequências naturais e frequências induzidas (ELETROBRÁS, 2003). As tensões admissíveis de compressão e de tração serão sempre fornecidas em função da resistência característica do concreto a compressão (ELETROBRÁS, 2003).

A capacidade de carga das fundações é relacionada à tensão normal máxima, definida mediante critérios de ruptura e as limitações relativas aos recalques excessivos, prejudiciais ao comportamento e utilização da estrutura. A capacidade de carga do material de fundação deve ser determinada por métodos adequados, utilizando como subsídios investigações geológico-geotécnicas e ensaios de laboratório (ELETROBRÁS, 2003).

2.8.5 Galgamento

Segundo Jónatas (2013), o galgamento de uma barragem se dá quando o nível de água ultrapassa a cota de coroamento da barragem. Esse evento pode ocorrer em função de um evento hidrológico superior ao tempo de recorrência de

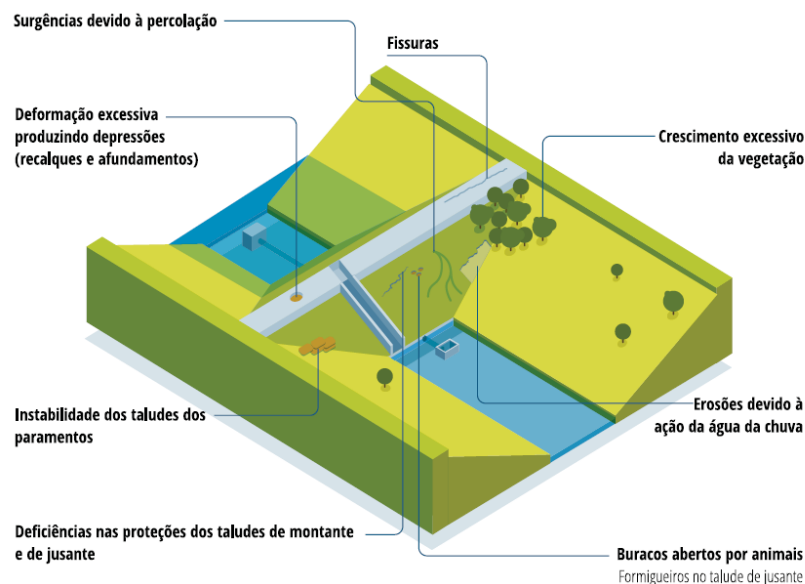
dimensionamento, falha no funcionamento das estruturas extravasoras, instabilidade de massa no reservatório ou uma onda relacionada à sismos.

2.9 ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS – ESTADO LIMITE E ANOMALIAS

O estado limite último de estruturas geotécnicas, na área da engenharia de barragens, normalmente está relacionada à ocorrência de galgamento ou instabilidade de talude (JÓNATAS, 2013).

Os tipos de anomalias (modos de falha) mais frequentes, em estruturas geotécnicas, que podem ser progressivas e ocasionar o estado de limite último, são fissuras, surgências de água (infiltração), erosão interna, superfície de escorregamento de taludes, depressões/recalques/desalinhamentos, deficiência na proteção superficial, erosão superficial e vegetação excessiva (ANA, 2016). A FIGURA 2.7 apresenta, de forma esquemática, algumas anomalias comuns em barragens de terra.

FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE ANOMALIAS



FONTE: RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM (2019).

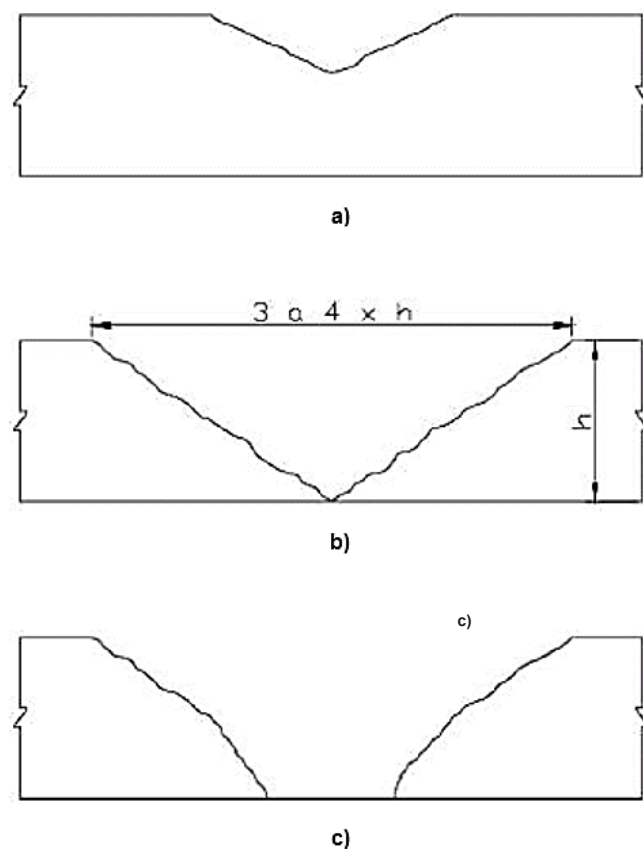
Não são inclusas, neste tópico, falhas relacionadas à mecânica das rochas.

2.9.1 Galgamento

Conforme apresentado no Item 2.8.5 acima, ocorre quando o nível de água ultrapassa a cota do coroamento da barragem/dique/canal. Em estruturas geotécnicas, a vazão sobre a estrutura causa abertura de brecha e erosão do material da crista/talude de jusante. Esses processos desencadeiam a formação de zonas frágeis, colapsos localizados e o processo pode evoluir até atingir colapso total da estrutura (JÓNATAS, 2013).

A dimensão da brecha de ruptura depende da duração do galgamento, das propriedades do material e das características do aterro. A brecha que se forma em uma barragem de aterro será, no início, triangular, evoluindo para trapezoidal com a progressão da erosão (JÓNATAS, 2013). A progressão de uma brecha é possível observar na FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 – EVOLUÇÃO DE UMA BRECHA PROVOCADA POR GALGAMENTO: a) brecha inicial b) brecha intermediária c) colapso total da estrutura



FONTE: Jónatas (2013).

2.9.2 Instabilidade de taludes

A instabilidade de taludes é deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência ao cisalhamento, causada por redução da resistência interna do material constituinte e/ou acréscimo das solicitações externas aplicadas no maciço (GERSCOVICH, 2016).

As principais razões de instabilidades em taludes são causas externas, internas e intermediárias. Pereira (2013) apresenta a descrição das principais causas na sequência.

As causas externas são ações que alteram o estado de tensão atuante sobre o maciço, resultando acréscimo de tensões cisalhantes que igualam ou superam a resistência ao cisalhamento. Podem ocorrer em função de aumento da inclinação do talude, depósito de material/carga ao longo da crista, efeitos sísmicos, cortes no pé do talude ou rebaixamento rápido do nível de água em um canal ou reservatório.

As causas internas são ações intrínsecas que atuam reduzindo a resistência ao cisalhamento, sem alterar a geometria do maciço. Podem ocorrer devido ao intemperismo, erosão interna, aumento da poropressão ou redução da coesão.

As causas intermediárias são ações que podem ocorrer na fundação devido ao aumento ou redução da subpressão, artesianismo ou liquefação espontânea.

2.10 ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco é uma ferramenta útil para a tomada de decisões, permitindo integrar toda a informação disponível, do empreendimento que será objeto de análise, em um modelo global. A análise inclui informações disponíveis em projetos, Planos de Ação de Emergência, normas e especificações, Revisões de Segurança, relatórios de análise de comportamento, além de informações através de uma visita técnica complementar (SPANCOLD, 2013).

A análise de risco tem se tornado uma demanda presente em projetos que envolvem barragens. De acordo com Melo (2014), a sociedade tem cada vez mais consciência que sempre existe um risco que deve ser avaliado e monitorado. A segurança integral e absoluta é inatingível, há sempre um risco envolvido em projetos de engenharia, mesmo que mínimo.

De acordo com SPANCOLD (2013), a realização de uma análise de risco envolve uma sequência de atividades, como a definição de objetivos e prazos, revisão de documentos técnicos do empreendimento, realização de uma inspeção técnica, discussão técnica relacionada ao estado do empreendimento, identificação dos modos de falha, definição do modelo de análise de risco, cálculo do risco, avaliação do risco e estudo de medidas para redução destes riscos.

A análise de riscos envolve áreas multidisciplinares, como domínio da geologia e geotecnia, estruturas, hidrologia e hidráulica, elétrica e mecânica, meio ambiente e ainda, conhecimento na área política, social e econômico-financeira (PIMENTA, 2009).

A análise de risco é utilizada como um complemento na avaliação da segurança de um empreendimento, na avaliação da natureza e dimensão de suas consequências e um instrumento de apoio em processos de tomada de decisões. De maneira geral, as análises de risco são realizadas em empreendimentos em fase de operação, no entanto, essas análises podem ser utilizadas durante o processo de concepção do projeto, contribuindo para seleção de soluções que reduzam as consequências de um possível acidente (PIMENTA, 2009).

As análises de riscos podem ser realizadas através de abordagens de análises indutivas e dedutivas, e podem ser classificadas por meio de métodos qualitativos e quantitativos (SANTOS, 2006).

A abordagem indutiva constitui um processo de descoberta que se inicia através de observações, em seguida são detectados padrões de comportamento que permitem definir um modelo de análise. Posteriormente, são formuladas hipóteses a serem exploradas e examinadas e o estudo é finalizado por meio de conclusões e teorias. Essa abordagem funciona de casos específicos para generalizações, sendo assim, é iniciada através de uma falha particular e analisando o efeito dessa falha no desempenho do sistema (SANTOS, 2006).

A abordagem dedutiva é um processo iniciado através de teorias, em seguida são definidas hipóteses que possam ser testadas e validadas através de observações e por último são realizados testes de hipóteses, com casos específicos, de forma confirmar as teorias originais. Ou seja, a abordagem dedutiva funciona do geral para o específico, portanto é iniciada pela ocorrência do estado limite último de um sistema e, posteriormente, identificando os eventos que geraram esta ocorrência (SANTOS, 2006).

Segundo Pimenta (2009), as metodologias que melhor se adequam ao domínio das barragens, são as apresentadas na sequência:

1. Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI – Location, Cause and Indicator Diagrams);
2. Registro de Riscos e Criticidade de Riscos;
3. Análise dos Perigos e da Operacionalidade (HAZOP – Hazard and Operability Analysis);
4. Análise de Modo e Efeito das Falhas (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis) e Análise do Modo, Efeito e Criticidade das Falhas (FMECA – Failure Mode, Effect and Criticality Analysis);
5. Análise de Árvore de Eventos (ETA – Event Tree Analysis);
6. Análise de Árvore de Falhas (FTA – Fault Tree Analysis).

2.10.1 Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI)

Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI – Location, Cause and Indicator Diagrams), que é descrita em “Risk Management for UK Reservoirs” (HUGHES et al., 2000), destina-se a realização de análises de riscos relativas aos modos de ruptura que originam a liberação da totalidade ou parte do volume armazenado do reservatório (CNPGB, 2006).

O método LCI é realizado em duas etapas, sendo a primeira relacionada à identificação e avaliação das consequências e a segunda etapa, ao reconhecimento dos modos de ruptura com capacidade de induzir uma onda de cheia a jusante (PIMENTA, 2009).

Na primeira etapa é realizada uma compilação de toda informação disponível relativa ao vale de jusante com interesse para análise (em uma extensão de até 30 km). É recomendado a realização de uma visita de inspeção ao vale próximo – eixo do barramento até 5 km (PIMENTA, 2009).

A distância (30 km) de análise poderá ser reduzida em situações que o hidrograma de cheia, provocado pela ruptura da barragem, seja menos danoso que o hidrograma relacionado a uma cheia com período de retorno (TR) de 100 anos (CNPGB, 2006). Após o conhecimento do vale a jusante do barramento, estima-se a vazão de pico, o tempo de ruptura e os níveis de água em seções representativas do

vale. Essas informações podem ser obtidas através de estudos de dam break (PIMENTA, 2009).

Segundo Pimenta (2009), com o conhecimento do vale a jusante e dos níveis de água atingidos pela cheia, é calculado o Índice Global de Impacto (IGI) – Equação 7. Esse índice considera a combinação ponderada da perda potencial de vidas humanas (PPV) e das perdas econômicas (PE) nas posições: próximo ao barramento (até 5 km) e distante do barramento (até 30 km).

A segunda etapa dos estudos é realizada para impactos médios ($IGI > 175$) e elevados ($IGI > 750$). Esta etapa é efetuada através de diagramas de localização, causa e indicadores de falhas e os resultados são apresentados sob a forma de três índices: índice de ordenação, índice de confiança e índice de criticidade. A combinação dos resultados das duas etapas permite o cálculo do risco (CNPGB, 2006).

Segundo Pimenta (2009), a metodologia LCI pode ser efetuada seguindo as seguintes atividades:

1. Identificação dos objetivos;
2. Especificação da equipe técnica;
3. Caracterização do vale a jusante numa extensão de até 30 km;
4. Realização de uma visita de inspeção ao vale próximo (5 km a jusante do barramento);
5. Estimativa da vazão de pico, tempo de chegada da vazão de pico, hidrograma de cheia e propagação do hidrograma no vale de jusante;
6. Identificação e avaliação das consequências no vale próximo e no vale afastado através do Índice Global de Impacto (IGI);
7. Se o $IGI \geq 175$, considera-se impacto alto e deve-se realizar a 2ª Etapa dos estudos. Se $IGI \leq 175$, encerra-se a aplicação do método;
8. $IGI > 750$: Reformulação do cálculo da propagação da cheia por intermédio de modelos numéricos e da identificação e avaliação das consequências;
9. $IGI < 750$: Caracterização geral da barragem, materiais e fundação. Análise dos elementos de projeto, construção, primeiro enchimento. Análise de órgãos extravasores. A Etapa 8 não precisa ser realizada se $IGI < 750$;
10. Realização de uma visita de inspeção ao empreendimento;
11. Preenchimento dos diagramas LCI;

12. Cálculo dos índices de ordenação, confiança, criticalidade e risco e sua apreciação em função dos objetivos da análise.

2.10.1.1 Etapa 1 – Análise das Consequências

A análise das consequências é realizada pelo IGI, cuja estimativa é realizada através do número de pessoas em perigo (PAR – *people at risk*) para quatro tipos de ocupação, quais sejam: Tipo 1: zonas residenciais; Tipo 2: zonas construídas não residenciais; Tipo 3: vias de comunicação e Tipo 4: áreas recreativas, e para a localização. Na sequência, é calculado a perda potencial de vidas humanas (PPV) com base no número de pessoas em perigo (PAR): $PPV = 0,5 \cdot PAR$, próximo ao barramento, $PPV = PAR^{0,6}$, no vale afastado (CNPGB, 2006).

As perdas econômicas (PE) são estimadas a partir de classificações atribuídas aos tipos de ocupação, quais sejam, Tipos 1 a 4 já citados anteriormente e Tipo 5: áreas industriais; Tipo 6: redes de abastecimento e Tipo 7: áreas agrícolas e habitats naturais. As perdas econômicas são calculadas pela ponderação dos tipos de ocupação, sendo: Tipo 1: 0,15; Tipo 2: 0,15; Tipo 3: 0,10; Tipo 4: 0,05; Tipo 5: 0,25; Tipo 6: 0,25 e Tipo 7: 0,05 (PIMENTA, 2009).

A TABELA 2.4 e a TABELA 2.5 apresentam as classificações quanto ao Número de Pessoas em Perigo e Perdas Econômicas, relacionadas ao tipo de ocupação.

TABELA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO NÚMERO DE PESSOAS EM PERIGO

TIPO 1 – ZONAS RESIDENCIAIS			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	Nº DE HABITAÇÕES AFETADAS	CLASSIFICAÇÃO	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 15	1	30
Média	16 a 50	2	100
Elevada	51 a 250	3	500
Muito Elevada	>250	4	2x nº habitações
TIPO 2 – ZONAS CONSTRUÍDAS NÃO RESIDENCIAIS (ESCOLAS, LOJAS, EMPRESAS)			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	CLASSIFICAÇÃO	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 150	1	150

Média	151 a 500	2	500
Elevada	501 a 1000	3	1000
Muito Elevada	>1000	4	Nº de pessoas
TIPO 3 – VIAS DE COMUNICAÇÃO			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE VIAS AFETADAS	CLASSIFICAÇÃO	PAR
Nenhuma	-	0	0
Pequena	Estradas municipais	1	25
Média	Estradas e ferrovias secundárias	2	50
Elevada	Estradas e linhas ferroviárias principais	3	100
Muito Elevada	Autoestrada, ferrovias de alta velocidade e aeroportos	4	estimativa
TIPO 4 – ÁREAS RECREATIVAS			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	Nº DE PESSOAS AFETADAS	CLASSIFICAÇÃO	PAR
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 10	1	10
Média	11 a 50	2	50
Elevada	51 a 100	3	100
Muito Elevada	>100	4	Nº de pessoas

FONTE: Modificado de Pimenta (2009).

TABELA 2.5 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AS PERDAS ECONÔMICAS

TIPO 5 – ÁREAS INDUSTRIAIS		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA INDUSTRIAL	CLASSIFICAÇÃO
Nenhuma	-	0
Pequena	Artesanal	1
Média	Associadas à saúde pública	2
Elevada	Perímetros industriais	3
Muito Elevada	Indústrias perigosas	4
TIPO 6 – REDES DE ABASTECIMENTO (ÁGUA, GÁS, ELETRICIDADE)		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA INDUSTRIAL	CLASSIFICAÇÃO
Nenhuma	-	0
Pequena	Local de distribuição	1
Média	Local de origem e distribuição	2

Elevada	Regionais	3
Muito Elevada	Nacionais	4
TIPO 7 – ÁREAS AGRÍCOLAS E HABITATS NATURAIS		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA AFETADA	CLASSIFICAÇÃO
Nenhuma	Não cultivada	0
Pequena	Pastagens	1
Média	Agricultura dispersa	2
Elevada	Agricultura intensa, habitats naturais e patrimônio nacional	3
Muito Elevada	Habitats protegidos e patrimônio mundial	4

FONTE: Modificado de Pimenta (2009).

O Índice Global de Impacto (IGI) é determinado pela Equação (7):

$$IGI = 100PE_{<5km} + PPV_{<5km} + 30PE_{<Entre\ 5-30km} + PPV_{<Entre\ 5-30km} \quad (7)$$

Onde:

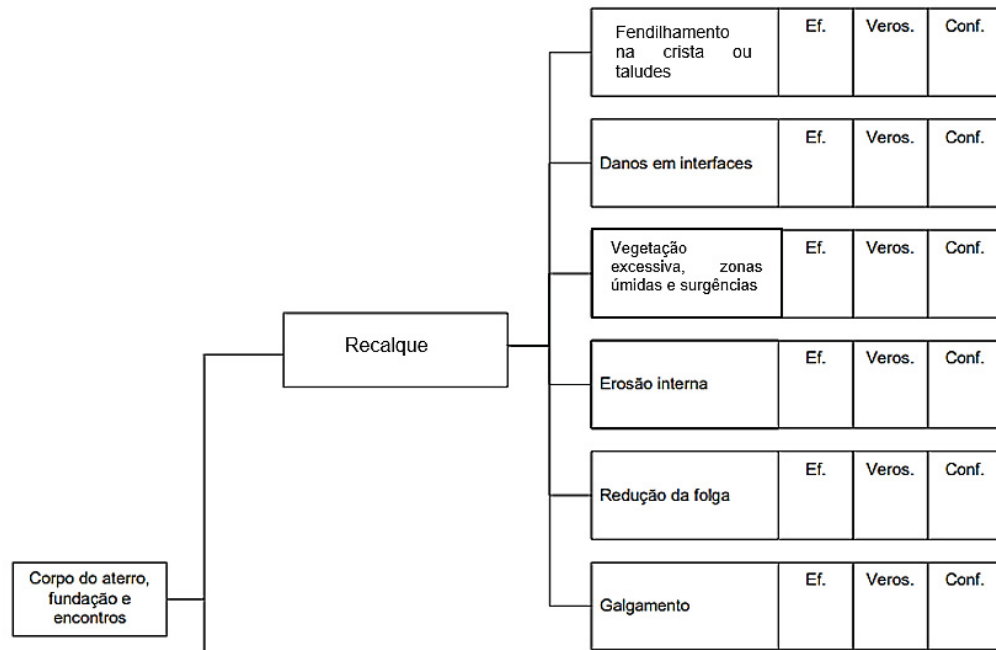
PE = Perdas econômicas;

PPV = Perda Potencial de Vidas Humanas.

2.10.1.2 Etapa 2 – Diagrama LCI

A identificação e avaliação dos modos de ruptura é realizada através de diagramas de Localização, Causa e Indicadores das falhas (LCI), assim designados por constituírem as áreas de diagramas relativas à localização da estrutura no empreendimento, às causas da ruptura desta estrutura e os indícios ou aos indicadores dos efeitos dos modos de falha na estrutura em análise (CNPGB, 2006). A FIGURA 2.9 apresenta parte de um diagrama para identificação e classificação dos modos de ruptura em uma estrutura.

FIGURA 2.9 – PARTE DE UM DIAGRAMA LCI PARA UMA BARRAGEM DE ATERRO



FONTE: Modificado de CNPGB (2006), adaptado de Hughes et al. (2000).

Segundo Pimenta (2009), as causas e os indicadores dos modos de ruptura são classificados através de três (3) atributos, apresentados na sequência:

- Efeito: relaciona o indicador, induzido pela causa em análise em uma determinada estrutura (localização), com a ruptura total ou parcial do empreendimento. Utilizar o número 1 para efeito baixo e o número 5 para efeito elevado;
- Probabilidade (verossimilhança): possibilidade de ruptura da estrutura no caso de ocorrência da causa e do indicador em questão. Utilizar o número 1 para baixa e o número 5 para elevada;
- Grau de confiança: nível de segurança das estimativas do efeito e da probabilidade, face as incertezas no conhecimento da estrutura em análise. Utilizar o número 5 para baixo/duvidoso e o número 1 para elevado/confiável.

Após a classificação dos três atributos, é realizada a ordenação dos conjuntos de localização/causa/indicador (CNPGB, 2006). A ordenação é feita com base nos seguintes índices:

- Índice de ordenação: produto do efeito pela probabilidade de ocorrência (verossimilhança);
- Índice de confiança: igual ao grau de confiança;
- Índice de criticidade: produto do efeito, probabilidade de ocorrência e grau de confiança.
- Índice de risco: produto do índice de criticidade pelo Índice Global de Impacto (IGI).

A análise dos valores dos índices permite hierarquizar os conjuntos localização/causa/indicador para possibilitar definir prioridades de medidas de mitigação ou definir trabalhos de investigação complementar (CNPGB, 2006). A TABELA 2.6 apresenta um exemplo de aplicação em um aterro de uma ensecadeira.

TABELA 2.6 – ÍNDICE DE ORDENAÇÃO, CRITICIDADE, CONFIANÇA E RISCO (ENSECADEIRA DE ODELAUCA)

LOCALIZAÇÃO	CAUSA	INDICADOR	ind _{ord}	ind _{crit}	ind _{conf}	ind _{risco} (IGI=191)	ind _{risco} (IGI=134)
Corpo da ensecadeira, fundação e encontros	Assentamentos	Fissuras na crista ou taludes	6	12	2	2292	1608
		Vegetação excessiva, zonas úmidas ou surgências	6	18	3	3438	2412
		Erosão interna	8	24	3	4584	3216
		Redução de folga	4	4	1	764	536
		Galgamento	5	5	1	955	670
Órgãos hidráulicos (e fundação)	Instabilidade	Fissuras/movimentos	4	12	3	2292	1608
		Vegetação excessiva, zonas úmidas ou surgências	6	18	3	3438	2412
		Redução de folga	8	8	1	1528	1072
		Galgamento	5	5	1	955	670
	Erosão interna	Vegetação excessiva, zonas úmidas ou surgências	6	18	3	3438	2412
		Piping	8	24	3	4584	3216
		Instabilidade de taludes	4	4	1	764	536
	Erosão externa	Deterioração do pé de jusante	1	1	1	191	134
		Deterioração do talude de jusante	4	4	1	764	536
		Deterioração do talude de montante	1	1	1	191	134
		Galgamento	20	20	1	3820	2680
	Danos estruturais	Erosão/fissuras	3	3	1	573	402
		Movimentos/rupturas	2	6	3	1146	804
		Redução da capacidade/aumento nível de água	5	10	2	1910	1340
	Obstruções	Danos nas estruturas	4	4	1	764	536
		Redução da capacidade/aumento nível de água	20	20	1	3820	2680
	Cap. de vazão inadequada	Danos nas estruturas	6	12	2	2292	1608
		Subida da água a montante	20	20	1	3820	2680

FONTE: CNPGB (2006)

O método LCI recomenda estudos aprofundados em relação à propagação de uma onda de cheia a jusante do barramento, quando o IGI for maior de 750, conforme pode ser observado na TABELA 2.7.

TABELA 2.7 – ÍNDICE GLOBAL DE IMPACTO

IGI	CLASSIFICAÇÃO	ETAPA
<175	Impacto baixo	Não é necessário realizar a 2ª Etapa.
175 a 750	Impacto médio	2ª Etapa dos estudos
>750	Impacto elevado	2ª Etapa dos estudos Exigindo estudos aprofundados em relação a propagação de onda de cheia à jusante do barramento.

FONTE: MODIFICADO DE PIMENTA (2009).

De acordo com o Grupo de trabalho de análise de riscos em barragens (CNPGB, 2006), os principais benefícios atribuídos a metodologia são: sistematização do conhecimento do sistema e reflexão sobre os modos de ruptura, ênfase na incerteza (índice de confiança) e clarificação de prioridades de intervenção. O grupo apresenta algumas limitações do método como: não ser possível obter um índice de risco global, classificação subjetiva dos atributos e inexistência de valores padrão que permitam uma avaliação global dos resultados.

2.11 ÁRVORE DE FALHAS (FTA)

O FTA (*Fault Tree Analysis*) foi inventado em 1961 na Bell Laboratories por HA Watson, com intenção de auxiliar no projeto do sistema de mísseis da Força Aérea dos Estados Unidos. A abordagem foi utilizada com sucesso por David Haasl da Boeing Company para analisar o sistema. O FTA tem sido utilizado em diversas áreas, mas não se limitando a: automotivo, aeroespacial e nuclear (KABIR, 2017).

Uma árvore de falhas estabelece ligações entre pontos críticos de um sistema, baseado em lógica binária, razão pela qual se aplica a álgebra booleana nos cálculos das probabilidades de acontecimentos de eventos indesejáveis (SCAPIN, 2013).

Em árvores de falhas, as conexões lógicas entre falhas e suas causas são representadas graficamente. É um método dedutivo de análise, assim, inicia-se com um evento de topo (evento indesejado) e funciona de “trás para frente”, do topo da

árvore em direção aos ramos inferiores, para determinar as causas raízes do evento indesejado. Os resultados da análise mostram como diferentes componentes falham ou certas condições podem combinar para causar a falha do sistema (KABIR, 2017).

As árvores de falhas podem apenas avaliar segurança e confiabilidade de sistemas estáticos, portanto sistemas que apresentam um modo único de operação ao longo de sua vida útil, apresentando comportamentos de falha. Sistemas modernos e complexos podem operar em várias fases, portanto possuem uma dinâmica de comportamento, levando a uma variabilidade de falhas dinâmicas, com eventos dependentes. Árvores de falhas são incapazes de capturar o comportamento dinâmico de falha (KABIR, 2017).

Em uma análise FTA desenvolve-se a efetivação do evento de topo em termos da ocorrência de eventos intermediários, os quais são decompostos até que sejam atingidos os eventos primários, ou também chamados de causas iniciadoras (*root causes*) de modos potenciais de ruptura (SANTOS, 2006).

De acordo com Kabir (2017), a análise de Árvores de Falhas é geralmente realizada em dois níveis: qualitativo e quantitativo. Em análises qualitativas normalmente são utilizados conjuntos de corte mínimos (MCS - *Minimal Cut Sets*), sendo que cada conjunto poderia conter um único evento ou vários eventos combinados por portas lógicas. A ordem de um conjunto de corte mínimo define o número de eventos básicos que contribuem para esse conjunto mínimo de cortes. Quanto menor for a ordem de um conjunto mínimo, maior a importância deste conjunto.

Uma análise quantitativa é uma avaliação probabilística que relaciona as probabilidades de falha de cada evento básico/primário e obtém como resultado a probabilidade de ocorrência do evento de topo. O método direto calcula a probabilidade de ocorrência do evento de topo a partir do cálculo de probabilidade de ocorrência de cada corte, em um processo de combinações de funções de probabilidade, de baixo - eventos básicos - para cima - evento topo (GONÇALVES, 2018).






A maior dificuldade do método direto consiste na necessidade de obter a taxa de ocorrência e duração da falha de todos os eventos base e dependência entre os eventos (álgebra booleana). Essas definições são importantes para determinar a estatística ou probabilidade dos eventos básicos e intermediários e, consequentemente, a probabilidade do evento de topo (GONÇALVES, 2018).

2.11.1 Eventos

De acordo com Kabir (2017), um evento básico não requer desenvolvimento ou expansão adicional, sendo que a combinação de eventos básicos gera os eventos intermediários, geralmente representados por uma determinada porta lógica.

Os eventos primários, segundo Pimenta (2009), podem ser de quatro tipos: eventos básicos, eventos condicionais, eventos por se desenvolver e eventos exteriores, cujas simbologias são apresentadas na TABELA 2.8.

TABELA 2.8 - ÁRVORE DE FALHAS - EVENTOS

SÍMBOLO	EVENTO	OBSERVAÇÕES
	Evento de topo	Evento indesejável
	Evento básico	Acontecimento iniciador ou falha inicial. É o nível mais inferior dos ramos das árvores de falhas.
	Evento condicional	Condições específicas ou restrições
	Evento exterior	Evento que ocorre habitualmente
	Evento por desenvolver	Ramo que não é objeto de desenvolvimento por não ser relevante e/ou não há informação suficiente para fundamentá-lo.

Fonte: MODIFICADO DE PIMENTA (2009).

Um evento condicional não representa necessariamente uma falha, normalmente é uma condição especial ou restrição para determinadas portas. O evento normal também não representa uma falha, corresponde a um valor nominal do comportamento do sistema. A FIGURA 3.2 apresenta a simbologia de eventos, segundo Kabir (2017).

FIGURA 2.10 – ÁRVORE DE FALHAS – SIMBOLOGIA DE EVENTOS



FONTE: Modificado de Kabir (2017).

O evento de topo é considerado como a perda de funcionalidade, colapso do sistema ou estado limite último. Em um sistema de engenharia é possível obter mais de um evento de topo, sendo que o número de Árvores de Falhas deve estar de acordo com o número de eventos de topo identificados (SANTOS, 2006).

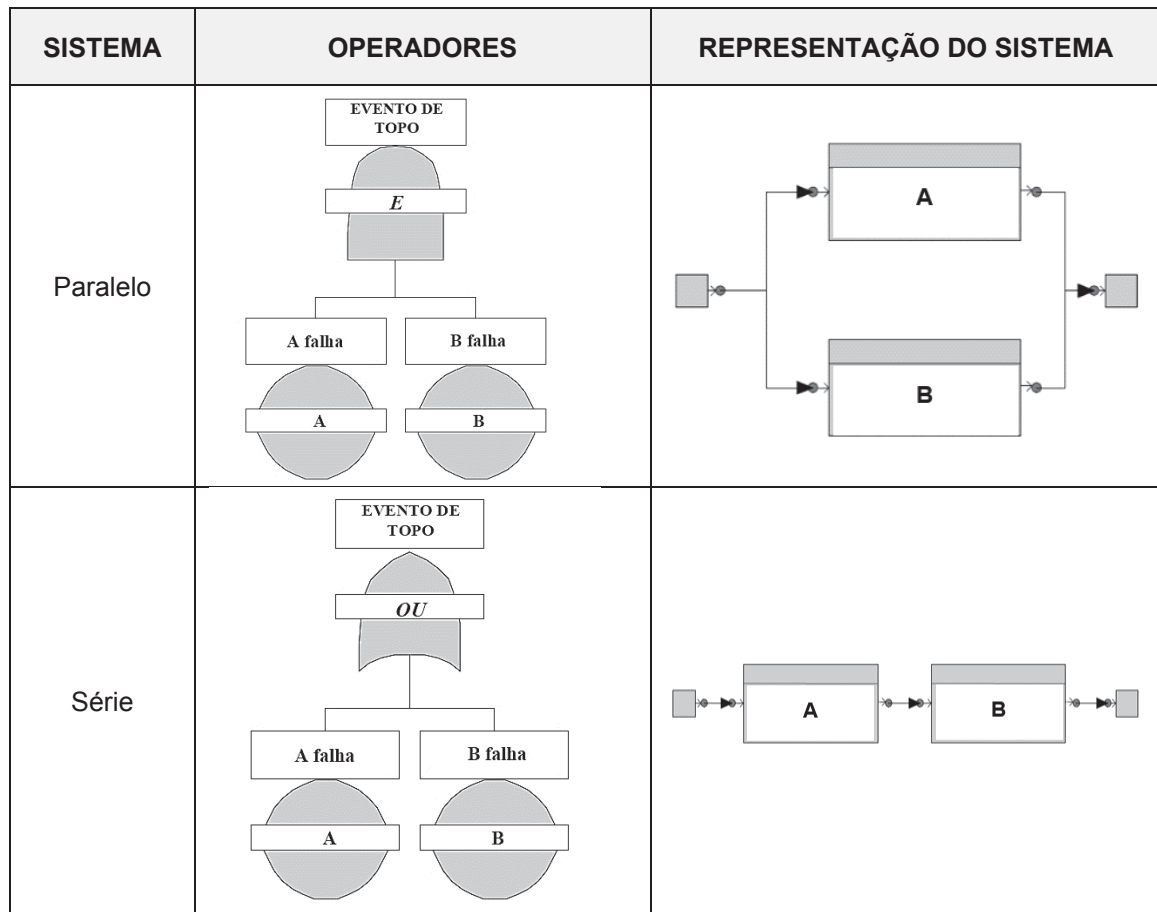
É possível utilizar como evento de topo a “falha total do sistema”, no entanto, a Árvore de Falhas pode se tornar extensa e complexa. Normalmente, as Árvores de Falha são construídas para cada estado limite último ou estado limite de serviço. Em situações pós acidentes os eventos de topo já foram determinados, porém, em situações prévias a acidentes é necessário o conhecimento dos possíveis modos de falha para determinação dos eventos topo (Pimenta, 2009).

2.11.2 Portas Lógicas / Operadores Lógicos

As portas lógicas conectam os eventos de acordo com as relações causais, estabelecidas pelo desdobramento das falhas, levando-se em consideração o funcionamento do sistema (SCAPIN, 2013).

Uma porta lógica define a relação de um evento de saída com eventos de entrada. Indica o fluxo que decorre das relações entre os eventos primários e o evento de topo, passando pelos eventos intermediários. Em uma visão redutora de uma Árvore de Falhas há duas possibilidades lógicas de operadores: “E” e “OU” (SANTOS, 2006). Estes operadores indicam uma analogia a um diagrama de blocos, onde a porta lógica “OU” é análoga a um diagrama de blocos em série e uma porta lógica “E” é análoga a um diagrama de blocos em paralelo (GONÇALVES, 2018). A FIGURA 3.3 ilustra a equivalência dos operadores com sistemas em série e paralelo.

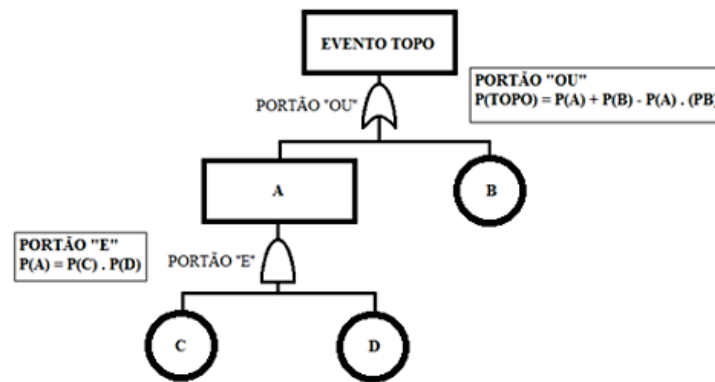
FIGURA 2.11 – EQUIVALÊNCIA DOS OPERADORES LÓGICOS “E” E “OU” COM SISTEMAS EM SÉRIE E EM PARALELO



FONTE: Modificado de Santos (2006).

O método direto é aplicado através da utilização da álgebra booleana, portanto as probabilidades de ocorrência de eventos interligados por uma porta “E” devem ser multiplicadas, enquanto as probabilidades de ocorrência de eventos interligados por uma porta “OU” devem ser somadas e ter o seu resultado subtraído pelo seu produto. O cálculo das probabilidades segundo o método direto está apresentado na FIGURA 3.4 (GONÇALVES, 2018).

FIGURA 2.12 – ÁRVORE DE FALHAS – MÉTODO DIRETO



$$P = \prod_{i=1}^n P(i)$$


$$P = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(i)]$$

FONTE: Gonçalves (2018).

A TABELA 2.9 apresenta variantes dos operadores, utilizados em Árvore de Falhas, que podem ser úteis na modelagem de situações complexas.

TABELA 2.9 - ÁRVORE DE FALHAS - OPERADORES LÓGICOS

SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	OBSERVAÇÕES
	Porta <u>E</u>	O evento de saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Porta <u>E</u> condicional	O evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem por ordem, da esquerda para a direita.
	Porta <u>OU</u>	O evento de saída ocorre se ocorrer pelo menos <u>um</u> dos eventos de entrada.
	Porta <u>OU</u> exclusiva	O evento de saída ocorre se ocorrer um de dois eventos de entrada e o outro não ocorrer.
	Porta <u>m</u> em <u>n</u>	O evento de saída ocorre se <u>m</u> dos <u>n</u> eventos de entrada ocorrerem. Trata-se de um caso particular da porta OU.

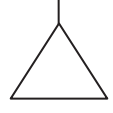
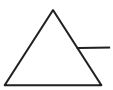
SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	OBSERVAÇÕES
	Porta <u>condicional</u>	O evento de saída ocorre quando ocorrerem os eventos de entrada e quando uma determinada condição for satisfeita. Trata-se de um caso particular da porta E.

Fonte: MODIFICADO DE PIMENTA (2009).

2.11.3 Elementos de Transferência

É possível utilizar elementos de transferência em duas situações: quando uma Árvore de Falhas não se ajustar em apenas uma folha e/ou determinado ramo da árvore for utilizado em diferentes zonas (SANTOS, 2006). A TABELA 2.10 apresenta a simbologia de elementos de transferência, também chamados de elementos de ligação.

TABELA 2.10 - ÁRVORE DE FALHAS – SIMBOLOGIA DOS ELEMENTOS DE TRANSFERÊNCIA

	Transferência para o interior	Indica que a árvore de falhas continua (em outra página) no correspondente símbolo de transferência para o exterior.
	Transferência para o exterior	Indica que a árvore de falhas deve ser ligada ao correspondente símbolo de transferência para o interior.

Fonte: MODIFICADO DE SANTOS, 2006.

2.11.4 Construção e Análise dos Resultados

O processo de construção e desenvolvimento de uma análise de Árvore de Falhas é geralmente uma atividade complexa, sendo a principal técnica de construção conhecida como “análise dedutiva”. Esta técnica de construção foi citada e apresentada pela *National Aeronautics and Space Administration* - NASA (2002) e Norma Internacional para FTA IEC 61025 (GONÇALVES, 2018).

Gonçalves (2018) apresenta em seu trabalho seis (6) etapas para construção de uma Árvore de Falhas, através da análise dedutiva:

1. Definição do evento indesejado, também chamado evento topo. Uma Árvore de Falhas é sempre orientada para um evento de topo singular, portanto, apenas um evento indesejado. Se houver vários eventos que possam ser considerados eventos de topo, a Árvore de Falhas deve ser elaborada para cada um destes.
2. Entendimento do sistema. O objetivo desta etapa é determinar todas as combinações possíveis de como o um sistema poderia falhar e causar o evento indesejado. Para analisar todo o sistema é interessante a formação de uma equipe de engenheiros e especialistas de diversas disciplinas. Nesta etapa é realizado o brainstorming (tempestade de ideias).
3. Construção da estrutura da Árvore de Falhas, relacionando as sequências possíveis de eventos que, quando ocorrem, resultam no evento indesejado. O evento indesejado ocorrer a partir de eventos básicos, passando por eventos intermediários através de portas lógicas.
4. Coleta de dados quantitativos. Nesta etapa deve ser determinada a probabilidade numérica da ocorrência de eventos. A probabilidade poderá ser realizada através de testes, com pequenos componentes constituintes do sistema ou a partir de variáveis históricas, dados do fabricante, entre outros indicadores.
5. Avaliação da probabilidade. Determinar quais combinações de falhas são mais susceptíveis de causar o evento topo.
6. Análise da saída com auxílio de um computador. Como as análises de árvores de falhas tendem a ser muito complexas, é interessante desenvolver a metodologia através de um *software*.

De acordo com Pimenta (2009), a álgebra booleana permite a manipulação de uma árvore de falhas, por intermédio da sua transformação em equação, segundo as regras apresentadas na FIGURA 3.5.

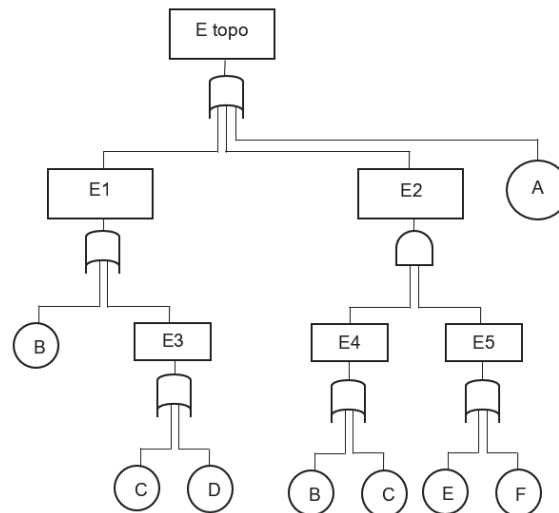
FIGURA 2.13 – REGRAS BÁSICAS DA ÁLGEBRA BOOLEANA

Comutativa	$A \times B = B \times A$
	$A + B = B + A$
Associativa	$A \times (B \times C) = (A \times B) \times C$
	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributiva	$A \times (B + C) = A \times B + A \times C$
Inalterabilidade	$A \times A = A$
	$A + A = A$

FONTE: Modificado de Pimenta (2009).

A FIGURA 3.6 apresenta um modelo de uma árvore de falhas, indicando letras e número figurativos como possíveis eventos.

FIGURA 2.14 – EXEMPLO DE UMA ÁRVORE DE FALHAS



FONTE: Modificado de Pimenta (2009).

O resultado de uma Árvore de Falhas, em uma análise qualitativa, é obtido por intermédio da transformação dos eventos do fluxograma em equações, através de álgebra booleana. Portanto, o resultado da Árvore de Falhas, apresentada na FIGURA 3.6, pode ser indicado através das equações apresentadas na sequência, nas quais a união de eventos (porta OU) é traduzida pelo símbolo “+” e a interseção (porta E) pelo símbolo “x” (PIMENTA, 2009).

$$E \text{ topo} = A + E1 + E2 \quad (3)$$

$$E1 = B + E3 \quad (4)$$

$$E1 = B + (C + D) \quad (5)$$

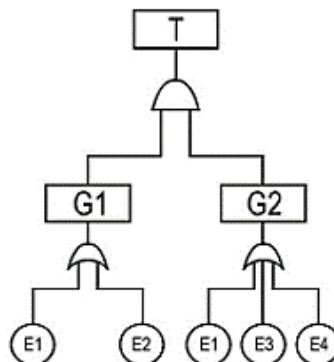
$$E2 = E4 \times E5 \quad (6)$$

$$E2 = (B+C) \times (E+F) \quad (7)$$

$$E \text{ topo} = A+B+C+D+[(B+C) \times (E+F)] \quad (8)$$

A combinação de eventos básicos que sejam suficientes para ocasionar a ocorrência do evento de topo é chamada de corte mínimo. Considerando a árvore de falhas apresentada na FIGURA 3.7, onde T é o evento de topo, G1 e G2 são eventos intermediários e E1, E2, E3 e E4 são básicos, se qualquer um dos eventos básicos ocorrerem o evento topo também ocorrerá. Isso porque os dois eventos intermediários estão ligados ao evento topo por uma porta lógica “E”.

FIGURA 2.15 – ÁRVORE DE FALHAS – EXEMPLO



FONTE: SCAPIN (2013).

Há seis (6) cortes mínimos na árvore de falhas apresentada acima, sendo:

$$CS1 = (E1, E1) = E1$$

$$CS2 = (E1, E3)$$

$$CS3 = (E1, E4)$$

$$CS4 = (E2, E1)$$

$$CS5 = (E2, E3)$$

$$CS6 = (E2, E4)$$

Portanto, os cortes mínimos reduzidos serão:

$$CS1 = E1$$

CS5 = (E2, E3)

CS6 = (E2, E4)

Um ponto crítico na análise dos cortes mínimos reduzidos é que eventos tidos como eventos exclusivos não podem existir no mesmo corte. Os cortes mínimos são qualificados de acordo com sua importância, ou seja, quanto a sua contribuição para ocorrência do evento de topo. Esse ranking qualitativo não é um pré-requisito para se realizar a análise quantitativa (SCAPIN, 2013).

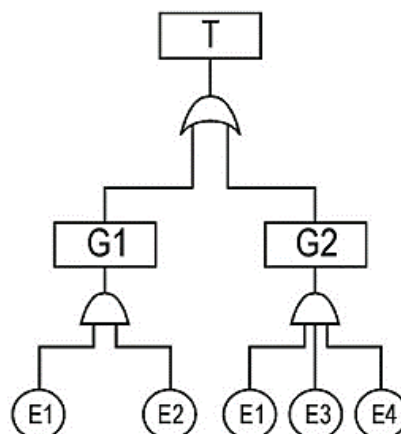
Outra análise que pode ser realizada é o número de eventos básicos, com a mesma probabilidade e estatisticamente independentes, em cada corte mínimo. Portanto se CS1 tem apenas um evento terminal e CS5/CS6 tem dois eventos, então o CS1 é um corte mínimo reduzido de primeira ordem e os CS5/CS6 são cortes mínimos de segunda ordem (SCAPIN, 2013).

A determinação de partes críticas de um sistema é mais comumente utilizada do que cortes mínimos. Para essa análise é possível representar uma árvore de sucesso, invertendo as portas lógicas, portanto, onde havia porta “OU” haverá porta “E” e vice-versa. Com a FTA reversa temos as seguintes partes críticas do sistema:

PS1 = (E1, E2) em função do evento intermediário G1.

PS2 = (E1, E3, E4) em função do evento intermediário G2.

FIGURA 2.16 – ÁRVORE DE FALHAS REVERSA



FONTE: Scapin (2013).

O corte PS1 significa que E1 e E2 são eventos simultâneos para o funcionamento do sistema, portanto o sistema só poderá falhar se ocorrer o funcionamento de um deles.

O corte PS2 significa que os eventos terminais E1, E3, E4 estiverem funcionando simultaneamente, o sistema não falhará, independente do evento terminal E2 falhar ou não. A análise de confiabilidade por sistemas críticos é muito utilizada pelas engenharias de produtos (SCAPIN, 2013).

A análise quantitativa pode ser efetuada independente da análise qualitativa, utilizando cortes mínimos ou métodos dos sistemas críticos. Algumas análises podem ser efetuadas manualmente, todavia, árvores complexas irão requerer programas computadorizados (SCAPIN, 2013).

O resultado de Árvores de Falhas pode ser analisado por meio de medidas de importância, através de grandezas como *Fussell-Vesely* ou *Birbaum*. A grandeza *Fussell-Vesely* indica a contribuição de um evento para a probabilidade do evento principal (topo). A grandeza *Birbaum* representa a sensibilidade da probabilidade do evento principal (topo) em função da variabilidade da probabilidade de um evento – desde “evento certo = 1” a “evento nulo = 0” (ITEM ToolKit, 2021).

Scapin (2013) apresenta em seu livro alguns benefícios da utilização de árvore de falhas, como: visualização do problema, identificação de itens que necessitam de um alto nível de confiabilidade, determinar a probabilidade de ocorrência de cada rota de falha, priorizar rotas de falhas dentro da análise, possibilita opções de análise qualitativa e quantitativa, permite identificar falhas no processo, permitem definir planos de manutenção, entre outros.

2.12 ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA)

Segundo Liu (2016), a metodologia FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) foi desenvolvida no EUA no início dos anos 1960 pela indústria aeroespacial, durante a missão Apollo, para avaliar o impacto de falhas no sucesso da missão, segurança dos integrantes, capacidade de manutenção e desempenho do sistema. No final de 1970, a Ford Motor Company introduziu o FMEA na indústria automotiva para a segurança, questões regulatórias e utilizou para melhorar a produção e o design.

Em 1990, a Organização Internacional de Padronização (ISO) recomendou o uso do FMEA para revisão de projeto na série ISO 9000. Em 1994, foi desenvolvida,

em conjunto com a Chrysler, Ford e General Motors, a primeira versão do padrão *Society of Automotive Engineers* (SAE) J1739, documento que descreve o uso do FMEA e fornece orientação para aplicação da metodologia (LIU, 2016).

Liu (2016) afirma que atualmente o FMEA tem sido amplamente utilizado como ferramenta para segurança, análise de confiabilidade de produtos e processos em uma ampla escala de indústrias, como aeroespacial, automotiva, nuclear, eletrônica, química, mecânica, saúde, entre outras.

A metodologia FMEA é uma ferramenta de planejamento de qualidade que tem como proposta identificar, nas etapas de projeto e processo, as possíveis falhas que podem ocorrer durante a fabricação de um produto. É um documento dinâmico e sua atualização deve ser contínua. Deve ser aplicado como uma filosofia corporativa em que todos devem estar comprometidos, cabendo os gestores identificar sua necessidade na empresa e a corporação perceber que ele não é uma tarefa obrigatória (MENEZES, 2020).

A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos é um dos métodos mais populares utilizados para avaliar a confiabilidade de sistemas. É uma ferramenta de avaliação que permite o usuário listar os componentes do sistema, identificando seus modos, efeitos e causas de falha, de forma a classificar sua criticidade ou risco. A abordagem pode ser modificada e aplicada a uma ampla gama de problemas e aplicações de engenharia (KOLIOS ET. AL., 2017).

De acordo com a norma da ABNT NBR 5462 (1994) – Confiabilidade e manutenibilidade, o FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade envolvendo o estudo dos modos de falha, que podem ocorrer em cada item, e a determinação dos efeitos sobre outros itens.

Segundo Teoh e Case (2004), o FMEA pode ser classificado em *Design* FMEA, direcionado para atividades de projeto, e o *Process* FMEA, utilizado para identificar modos de falha durante um processo de fabricação.

Menezes (2020) afirma que o FMEA é uma técnica utilizada como auxílio a gerentes e engenheiros para identificação de possíveis modos de falha e propondo ações para sua eliminação ou minimização. Adicionalmente, pode ser considerada uma metodologia para identificar e eliminar falhas, melhorando a confiabilidade e segurança de sistemas, produtos e serviços.

Menezes (2020) indica que a metodologia FMEA é apresentada em pelo menos seis (6) padrões internacionais, como:

- MIL-STD 1629A (US MILITARY STANDARD 1629A, 1980) – Forças armadas dos Estados Unidos;
- AIAG's FMEA 4th Edition (AIAG, 2008) - Manual de referência criado pela Chrysler LLC, Ford Motor Company e General Motors Corporation;
- IEC 60812 (IEC, 2006) – Elaborada pela organização internacional de padronização de tecnologias;
- BS EN IEC 60812 (BSI, 2018) - Versão europeia do IEC 60812;
- SAE-J1739 (SAE, 2002) - Documento direcionado a área automotiva;
- IATF 16949 (IATF, 2016) - Norma direcionada a indústria automotiva.

A sigla FMECA tem origem da expressão em inglês *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* e é traduzida como Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticalidade. Se refere a mesma metodologia do FMEA, todavia há inclusão da criticalidade – ocorrência x severidade (SAKURADA, 2001).

Segundo Kolios et al. (2017), a metodologia inicia com uma análise qualitativa dos sistemas e suas funções, seguida por uma avaliação quantitativa dos riscos potenciais, de acordo com os dados disponíveis, bem como a identificação de ações corretivas para cada modo de falha.

De acordo com Sakurada (2001), a relação entre modo de falha e efeito, se controlada adequadamente, pode auxiliar na análise da confiabilidade e nos processos de manutenção a serem adotados.

Liu (2016) indica como procedimento geral para realização de um FMEA, de forma eficaz, nove (9) etapas, apresentadas resumidamente na sequência:

- Etapa 1: Determinar o escopo da análise. O FMEA pode ser utilizado para projeto, processo ou manutenção. Portanto, a limitação do escopo é importante para estabelecer as questões que devem ser consideradas e as abordagens que a equipe fará durante a análise.
- Etapa 2: Definir equipe. O FMEA não deve ser aplicado por apenas um indivíduo, desse modo é importante formar uma equipe com especialistas em diferentes áreas. A equipe deve ser multifuncional e multidisciplinar.
- Etapa 3: Compreender o sistema a ser analisado. Dividir o sistema em subsistemas, interpretar os projetos, utilizar esquemas e fluxogramas para identificar componentes e relação entre os componentes.

- Etapa 4: Discussão com a equipe sobre os modos de falha de cada componente e seus possíveis efeitos.
- Etapa 5: Determinar a probabilidade de ocorrência, severidades dos efeitos e probabilidade de detecção para os modos de falha. É importante personalizar as escalas de classificação dos riscos dentro da organização, de forma que toda a equipe tenha o mesmo entendimento das classificações.
- Etapa 6: Calcular o RPN/NPR (Número de Prioridade de Risco) de cada modo de falha. É calculado multiplicando os fatores de risco que representam a probabilidade de ocorrência, severidade e probabilidade de detecção.
- Etapa 7: Priorizar os modos de falha para ações. Classificar os modos de falha em ordem decrescente, de acordo com o RPN/NPR.
- Etapa 8: Preparar um relatório com os resultados da análise. O processo FMEA deve ser documentado através de um formulário, o qual pode ser executado em forma de planilha.
- Etapa 9: Revisar o RPN/NPR se os modos de falha forem reduzidos ou eliminados. A reavaliação do risco é muito importante quando as ações ou medidas mitigadoras são implementadas no sistema.

Os formulários ou planilhas são desenvolvidos de acordo com os critérios de cada empresa, não existindo uma padronização. As figuras na sequência (FIGURA 2.17, FIGURA 2.18, FIGURA 2.19) apresentam exemplos em formato de planilha e modelos de estruturas para aplicação dos métodos FMEA/FMECA.

FIGURA 2.19 – APLICAÇÃO DA FMEA EM UM SECADOR INDUSTRIAL

APLICAÇÃO DA FMEA AO SECADOR INDUSTRIAL TSK 5-CD (MI-423)													
Sistema	Subsistema	Item	Função	Modo de falha	Causa	Ocorrência	Efeito de falha				Severidade	Detetabilidade	RPN
							Saúde e segurança	Meio-ambiente	Custo de não-produção	Custo de reparação			
SISTEMA PRINCIPAL DO SECADOR	Subsistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Motor para durante a operação	Interrupção do fornecimento corrente elétrica	6	1	1	2	1	2	2	24
					Cabos danificados devido a choques mecânicos	2	1	1	2	2	2	4	16
					Cabos queimados/derretidos devido a sobrecarga	2	1	1	2	2	2	4	16
			Avaria no arrancador	2	1	1	2	2	2	2	8		
			Sobrecarga mecânica	6	1	1	2	2	1	2	24		
			Falta de uma ou mais fases	2	1	1	2	2	2	4	16		
	Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Avaria no arrancador	Desequilíbrio de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8
					Quedas de tensão	2	1	1	2	2	2	2	8
					Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12
					Enrolamentos com humidade	2	1	1	2	2	2	2	8
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8
					Arranques frequentes	4	1	1	2	2	1	2	16
	Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Falha dos rolamentos	Fratura do veio	Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48
					Barra do rotor partidas	2	1	1	4	4	4	6	48
					Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração	6	1	1	2	2	2	1	12
					Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro)	2	1	1	2	4	4	6	48
					Falhas de isolamento	2	1	1	2	2	2	2	8
					Pata coxa	4	1	1	2	2	2	6	48
					Lubrificação incorreta	2	1	1	4	2	2	16	
					Rotor desequilibrado	2	1	1	4	4	4	6	48
					Desalinhamento do veio	6	1	1	4	4	4	6	144
					Ajustes mecânicos incorretos	2	1	1	4	2	4	6	48
				Chumaceiras de rolamento defeituosas	1	1	1	4	2	4	6	24	
				Flexão ou fadiga torsional proveniente do desalinhamento	1	1	1	4	4	4	6	24	
				Sobrecarga durante a operação	2	1	1	4	4	4	10	80	
				Rotor bloqueado	2	1	1	4	4	4	4	32	
				Danos provocados durante ação de manutenção	1	1	1	4	4	4	8	32	
				Defeitos de fabrico	1	1	1	4	4	4	8	32	

FONTE: Pedrosa (2014).

De acordo com Pedrosa (2014), devem ser indicados todos os componentes ou processos que podem estar sujeitos a falhas potenciais. A função de cada componente deve ser indicada e, caso este tenha mais que uma função com modos de falha distintos, devem ser indicadas separadamente.

Santos (2006) indica que um refinamento excessivo na modelagem do sistema não produz necessariamente uma análise com melhores resultados, e ainda, pode gerar uma análise bastante trabalhosa e complexa. A objetividade é um aspecto importante para clareza dos resultados em uma análise de risco.

As causas ou mecanismos potenciais de falhas definem-se como uma indicação de deficiência do projeto/processo cuja consequência origina o modo de falha. Para a determinação das causas, a equipe deve questionar-se sobre o que pode impedir que o projeto/processo cumpra os seus objetivos (PEDROSA, 2014).

2.12.1 Classes de Probabilidade de Ocorrência

Nas análises de riscos em sistemas mecânicos e elétricos, através da metodologia FMEA, a avaliação da probabilidade de ocorrência é baseada em taxas de falha de cada componente – fornecidas pelos fabricantes em condições definidas. Todavia, para análises de risco na área de barragens não é possível obter esse tipo de taxa de falha, portanto, são utilizadas tabelas orientativas e a atribuição das classes de probabilidade de ocorrência é de caráter subjetivo (SANTOS, 2006).

A TABELA 2.11, TABELA 2.12 e TABELA 2.13 apresentam algumas orientações de classes de probabilidade de ocorrência utilizadas em estudos de FMEA realizados por outros autores.

TABELA 2.11 – CLASSES DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

CLASSE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	INTERVALOS DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO
A	<0,1%	Improvável
B	0,1% - 1%	Remota
C	1% - 10%	Ocasional
D	10% - 20%	Provável
E	>20%	Frequente

Fonte: Santos (2006), Segundo Norma MIL-STD 1629A (2005).

TABELA 2.12 – ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (EVENTOS POR ANO)
1	Improvável (até 0,01%)
2 / 3	Remota (0,01 a 0,1%)
4 / 5	Ocasional (0,1 a 1%)
6 / 7	Alto (1 a 10%)
8 / 9	Esperado (10 a 20%)
10	Provável (> 20%)

Fonte: Fonseca (2018), adaptado da Norma SAE J1739 (1994).

TABELA 2.13 – CLASSIFICAÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE UM MODO DE FALHA

CLASSIFICAÇÃO	PROBABILIDADE DE FALHA	PROBABILIDADE DE FALHA
10	Extremamente alta: falha quase inevitável	≥ 1 ou 2
9	Muito alta	1 em 3
8	Falhas repetidas	1 em 8
7	Alta	1 em 20
6	Moderada a alta	1 em 80
5	Moderada	1 em 400
4	Relativamente baixa	1 em 2.000
3	Baixa	1 em 15.000
2	Remota	1 em 150.000
1	Quase impossível	≤ 1 em 1.500.000

Fonte: Modificado de Liu (2016).

2.12.2 Classes de Severidade

A severidade consiste na quantificação do efeito do potencial modo de falha para o subsistema, sistema e outros. É um critério que realiza análise do efeito, em escala de severidade, sendo o menor valor correspondente a condição mais favorável e o maior valor a condição menos favorável (ANTUNES, 2020).

Na sequência são apresentadas tabelas orientativas (TABELA 2.14 a TABELA 2.16), baseadas na bibliográfica técnica, que permitem a classificação dos efeitos e consequências dos modos de falha.

TABELA 2.14 – CLASSES DE SEVERIDADE

CLASSE DE SEVERIDADE	ÁREAS DE INTERESSE			
	SAÚDE E SEGURANÇA DE PESSOAS	MEIO AMBIENTE	ECONÔMICO	CENSURA DA OPINIÃO PÚBLICA
I	Negligenciável	Sem impacto mensurável	Impacto baixo (<10 mil)	Nenhuma
II	Primeiros socorros	Reduzidos impactos na área	Impacto médio (10 mil – 100 mil)	Baixa
III	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Impacto médio – alto (100 mil – 1 milhão)	Média-Baixa
IV	Incapacidade temporária	Prejuízo local	Impacto alto (1 – 10 milhões)	Média
V	Incapacidade permanente/fatalidade	Impacto significativo (reversível)	Impacto muito alto (10 – 100 milhões)	Média-Alta
VI	Fatalidades numerosas	Impacto catastrófico (irreversível)	Impacto enorme (> 100 milhões)	Alta

FONTE: Adaptado de Santos (2006).

TABELA 2.15 – CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE DE UM MODO DE FALHA

CLASSIFICAÇÃO	EFEITO	SEVERIDADE DO EFEITO
10	Perigoso, sem aviso	Classificação de severidade mais alta de um modo de falha, ocorrendo sem aviso
9	Perigoso, com aviso	Classificação de severidade mais alta de um modo de falha, ocorrendo com aviso.
8	Muito alto	A operação do sistema ou produto é interrompida sem comprometer a segurança.

CLASSIFICAÇÃO	EFEITO	SEVERIDADE DO EFEITO
7	Alto	A operação do sistema ou produto pode ser continuada, porém o desempenho do sistema ou produto é afetado.
6	Moderado	A operação do sistema ou produto é continuada, porém o desempenho do sistema ou produto está reduzido.
5	Baixo	O desempenho do sistema ou produto afetado e a manutenção é necessária.
4	Muito baixo	O desempenho do sistema ou produto é pouco afetado e a manutenção pode não ser necessária.
3	Reduzido	Desempenho e satisfação do sistema com afetação reduzida.
2	Extremamente reduzido	Desempenho e satisfação do sistema com afetação mínima.
1	Nenhum	Sem afetação.

FONTE: Adaptado de Liu (2016).

TABELA 2.16 – DEFINIÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE

SEVERIDADE	IMPACTOS AMBIENTAIS
1	Não são esperados impactos.
2	Prejuízo de baixa relevância.
3	Prejuízos individuais, reversíveis a curto prazo.
4	Prejuízos homogêneos, reversíveis a curto prazo.
5	Prejuízos homogêneos, reversíveis a longo prazo.
6	Prejuízos coletivos, reversíveis a curto prazo.
7	Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo.
8	Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo, de extensão patrimonial e moral.
9	Prejuízos coletivos de grandes proporções, de difícil reparação.
10	Prejuízos irreparáveis ao meio ambiente.

FONTE: Fonseca (2018), Adaptado da Norma SAE J1739 (1994).

2.12.3 Classes de Probabilidade de Detecção

A Detecção indica a eficiência dos controles de percepção da falha, portanto, quanto maior for o valor atribuído ao índice de detecção significa que maior será a dificuldade de detectar a falha (SAKURADA, 2001). Fonseca (2018) indica que a inserção do índice de detecção é de essencial importância, considerando que alguns mecanismos deflagradores de acidentes não demonstram alertas claros ou em tempo de evitar a falha.

Na sequência são apresentadas algumas tabelas orientativas (TABELA 2.17 e TABELA 2.18), segundo a bibliografia técnica consultada, que possibilitam a classificação da probabilidade de detecção dos modos potenciais de falha.

TABELA 2.17 – AVALIAÇÃO DA DETECÇÃO

PROBABILIDADE DE DETECÇÃO	CRITÉRIO	DETECÇÃO
Quase impossível	Não conhecido controle disponível para detectar o modo de falha.	10
Muito remota	Probabilidade muito remota de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	9
Remota	Probabilidade remota de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	8
Muito baixa	Probabilidade muito baixa de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	7
Baixa	Probabilidade baixa de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	6
Moderada	Probabilidade moderada de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	5
Moderadamente alta	Probabilidade moderadamente alta de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	4
Alta	Probabilidade alta de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	3
Muito alta	Probabilidade muito alta de que o controle atual irá detectar o modo de falha.	2
Quase certa	Controle atual quase certamente irá detectar o modo de falha.	1

FONTE: Fernandes e Rebelato (2006).

TABELA 2.18 – ÍNDICE DE DETECÇÃO

ÍNDICE DE DETECÇÃO	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO
1	Quase certo
2	Elevado
3	Alto
4	Moderadamente alto
5	Moderado
6	Baixo
7	Muito Baixo
8	Remoto
9	Muito remoto
10	Quase impossível

FONTE: Fonseca (2018), Adaptado da Norma SAE J1739 (1994).

2.12.4 Estimativa de Risco

De acordo com Santos (2006), a criticidade de um modo de ruptura pode ser determinada através do resultado do produto entre a probabilidade de ocorrência de um evento e a severidade de suas consequências/efeitos. Para essa análise é possível utilizar índices ponderativos para as classes de probabilidade de ocorrência e classes de severidade, conforme é possível observar na TABELA 2.19 e na TABELA 2.20.

TABELA 2.19 – ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

CLASSE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (O)
A	1
B	2
C	4
D	7
E	10

FONTE: Modificado de Santos (2006).

TABELA 2.20 – ÍNDICE DE SEVERIDADE

CLASSE DE SEVERIDADE	ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)
I	1
II	2
III	4
IV	6
V	9
VI	10

FONTE: Modificado de Santos (2006).

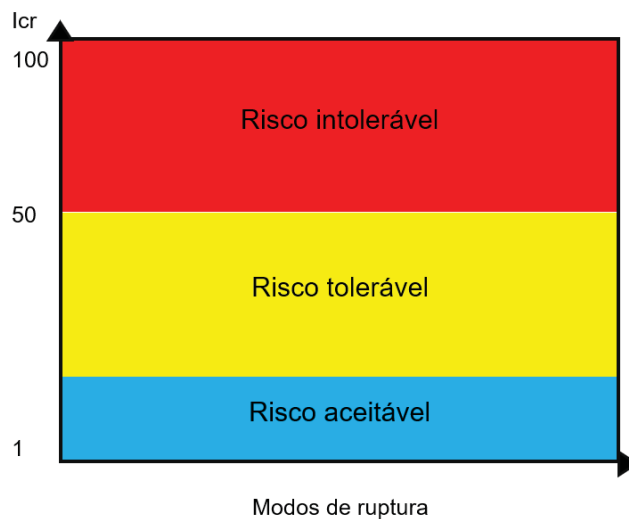
A utilização dessa abordagem permite analisar a criticidade de cada modo de falha, através do índice de criticidade (ICR), sendo igual:

$$\text{ICR} = \text{S (Índice de severidade)} \times \text{O (Índice de probabilidade de ocorrência)} \quad (9)$$

Além do índice de criticidade, é possível analisar o risco dos modos de falha através do Número de Prioridade de Risco (*RPN – Risk Priority Number*), índice que expressa a prioridade do nível de risco através de três índices – severidade, ocorrência e detecção. No cálculo do RPN, os valores atribuídos nas três escalas qualitativas são interpretados em números, portanto, informações inicialmente coletadas são arbitrariamente interpretadas e utilizadas em uma escala quantitativa (FRANCESCHINI E GALETTO, 2001).

Para efetuar a gestão dos riscos é necessário conhecer os limites de aceitabilidade e tolerabilidade associados ao tipo de obra em análise. Os limites dos riscos podem ser expressos em valores e cores, através do índice de criticidade (SANTOS, 2006). A FIGURA 2.20 representa a criticidade dos modos de falha através de um modelo gráfico.

FIGURA 2.20 – LIMITES DOS RISCOS PARA O ÍNDICE DE CRITICIDADE



FONTE: Modificado de Santos (2006).

No Brasil o RPN também pode ser chamado de NPR (Número de Prioridade de Risco), ambos com o mesmo significado. O NPR é o produto dos índices atribuídos à severidade, à probabilidade de ocorrência e à probabilidade de detecção dos modos potenciais de falha, conforme expressão apresentada na sequência (FONSECA, 2018):

$$\text{NPR} = S \times O \times D \quad (10)$$

Onde:

S = índice de severidade;

O = índice de probabilidade de ocorrência;

D = índice de probabilidade de detecção.

Outra abordagem para avaliação do risco é através de uma matriz bidimensional, que relaciona a probabilidade de ocorrência com as consequências (PIMENTA, 2009). A FIGURA 2.21 apresenta um exemplo de uma matriz de riscos.

FIGURA 2.21 – MATRIZ DE CRITICIDADE

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	MUITO ELEVADA	4	5	6	6	6
	ELEVADA	3	4	5	6	6
	MODERADA	2	3	4	5	6
	POUCO PROVÁVEL	1	2	3	4	5
	PARA	1	1	2	3	4
		MUITO BAIXAS	BAIXAS	MODERADAS	ELEVADAS	MUITO ELEVADAS
	CONSEQUÊNCIAS					

FONTE: Pimenta (2009)

Segundo Fonseca (2018), a Norma SAE J1739 (1994) obtém como produto uma relação entre a probabilidade de ocorrência e a severidade das consequências, graficamente representada como uma matriz de avaliação de risco bidimensional, conforme é possível observar na FIGURA 2.22.

FIGURA 2.22 – MATRIZ DE ANÁLISE DE RISCO

		SEVERIDADE									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OCORRÊNCIA	10	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Red	Red	Red	Red	Dark Red	Dark Red
	9	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Red	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	8	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	7	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	6	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	5	Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Orange	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	4	Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Orange	Red	Dark Red	Dark Red	Dark Red
	3	Dark Blue	Dark Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Dark Red	Dark Red
	2	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Orange	Dark Red
	1	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Dark Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Orange	Orange

FONTE: Fonseca (2018), Adaptado da Norma SAE J1739 (1994).

Pedrosa (2014) efetua a classificação do grau de risco através da categorização do NPR, de modo obter quais modos de falha requerem maior atenção e a realização de ações de melhoria, de forma a diminuir o risco associado a cada uma das falhas.

FIGURA 2.23 – MATRIZ DE ANÁLISE DE RISCO

Grau de risco (NPR)		Grau de urgência das medidas
GR \geq 96 *	Risco Elevado	Requer ação imediata para diminuir o risco (atuando em "O", "S" ou "D")
$32 \leq$ GR < 96	Risco Moderado	Devem ser tomadas ações logo que possível para diminuir o risco
GR < 32 **	Risco Baixo	Devem ser tomadas medidas de melhoria sem carácter de urgência

FONTE: Pedrosa (2014).

As análises de riscos devem ser revisadas e reavaliadas quando houver conhecimento de uma informação ou documentação adicional, modificações no empreendimento, manutenções, acontecimentos que comprometam ou alterem determinados aspectos e/ou implementação de medidas de controle (SANTOS, 2006).

Menezes (2020) expõe em seu estudo que a metodologia FMEA foi citada como uma das primeiras técnicas estruturadas, sistemáticas e proativas utilizadas para análise de falhas e uma das ferramentas mais eficientes na prevenção de problemas e identificação de soluções mais eficazes.

De acordo com Kolios et al. (2016), o método possui algumas desvantagens, como: diferentes combinações de O, S e D podem produzir o mesmo RPN, dificuldade na previsão dos valores de O, S e D, as interdependências entre os modos de falha não são consideradas e o RPN não é capaz de medir a eficácia das ações corretivas.

Franceschini e Galetto (2001) indicam alguns problemas relacionados à interpretação do RPN, como: a definição do RPN em uma escala mais ampla que os três índices podem gerar um trabalho extensivo para resolução, a suposição de que os três índices (S, O e D) são igualmente importantes e a possibilidade de obter o mesmo RPN com combinações de índices diferentes.

Menezes (2020) afirma em seu estudo que 62% das críticas da metodologia FMEA fazem referência aos fatores de Severidade, Ocorrência e Detecção, por não se considerar a importância relativa entre os mesmos e pelo fato de o RPN ser calculado pela simples multiplicação destes fatores, gerando valores iguais, mas com riscos diferentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as etapas percorridas para a proposição de um método de análise de risco, através do Risco Global de Impacto (RGI) – inspirado nas metodologias FMEA e LCI – e aplicação da Árvore de Falhas (FTA), assim como a apresentação dos dados e referências utilizadas durante o processo.

Durante a revisão bibliográfica foram estudados e testados distintos métodos de análises de risco em um estudo de caso, com o intuito de definir os métodos detalhados neste trabalho.

Os métodos de análise de risco foram escolhidos em função das distintas abordagens, sendo o FMEA e o LCI desenvolvidos através de uma abordagem indutiva e a Árvore de Falhas desenvolvida através de uma abordagem dedutiva. Além disso, para a Árvore de Falhas optou-se por utilizar um processo semiquantitativo, indicando valores em porcentagem para os eventos básicos e um *software* (*ITEM ToolKit*) para o processamento de dados.

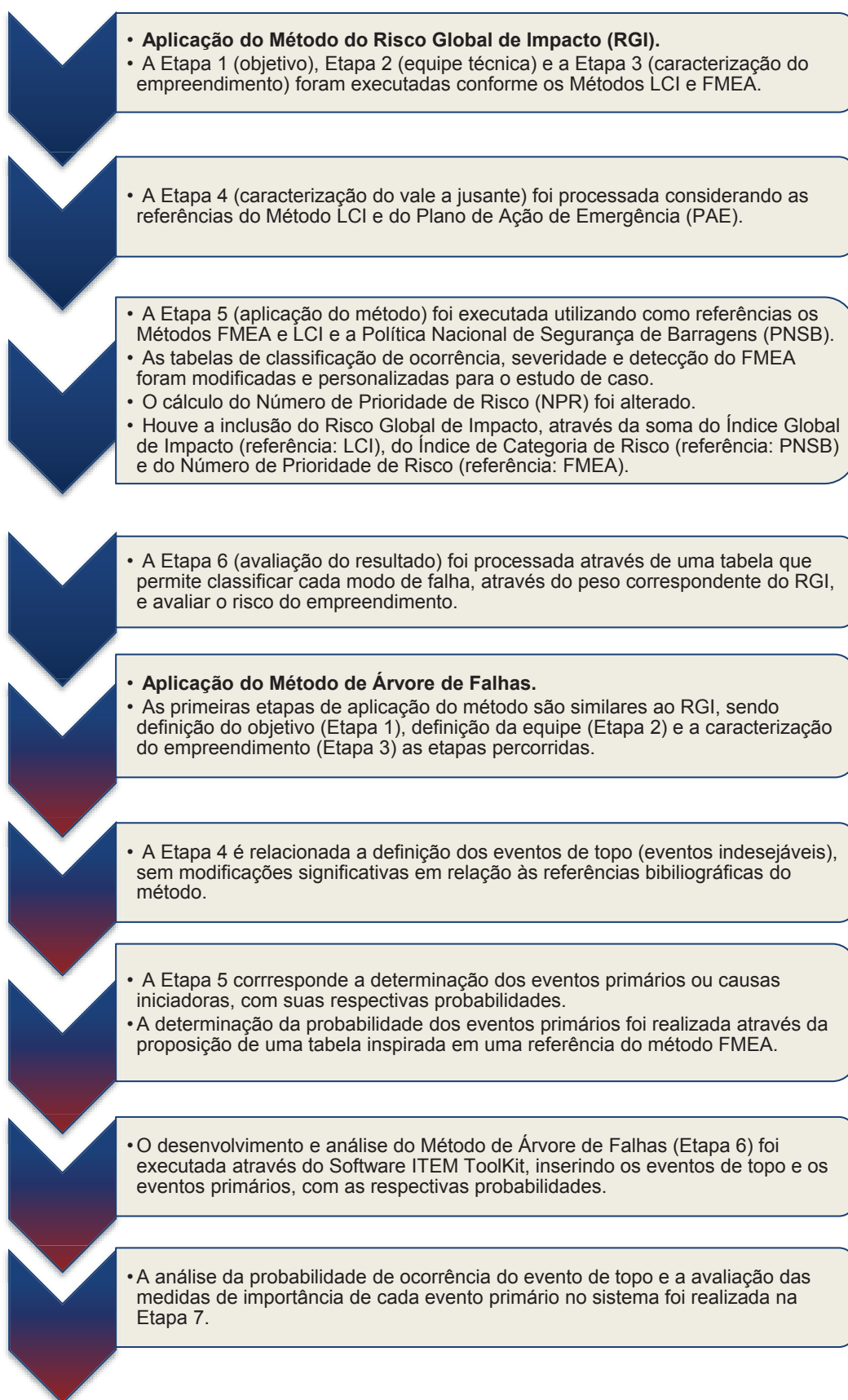
Os métodos FMEA e LCI foram combinados e personalizados com o intuito de propor um método de análise de risco, incorporando dados da Política Nacional de Segurança de Barragens Brasileira, como ponto de partida para estudos futuros de desenvolvimento de métodos de análise de risco consolidados na área de barragens.

É importante informar que os métodos não foram calibrados e testados em outros empreendimentos. Os pesos e equações propostas não foram calibradas e consolidadas, esses dados têm como finalidade permitir o estudo e aplicação dos métodos em um estudo de caso.

A análise de risco foi realizada em um empreendimento hidrelétrico, sendo a escolha motivada por ser uma obra em operação com previsão de ampliação em 2021, tornando possível a adoção do conhecimento adquirido, através deste trabalho, durante a realização do projeto executivo da ampliação.

Na FIGURA 3.1 são apresentadas as principais atividades percorridas para o desenvolvimento da metodologia deste trabalho.

FIGURA 3.1 – MATERIAIS E MÉTODOS – FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS

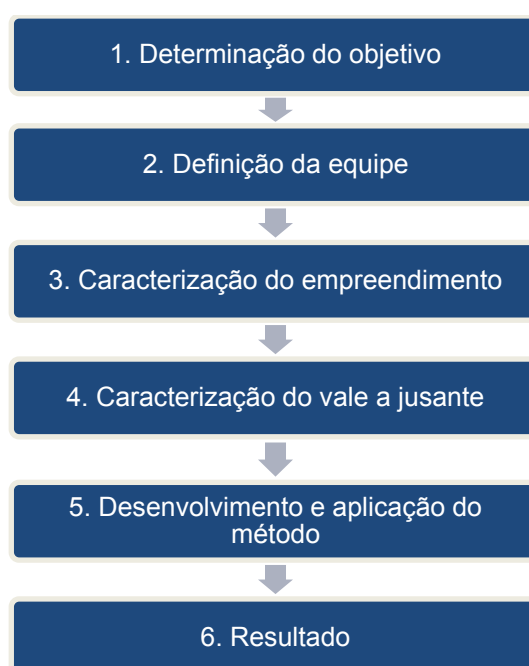


FONTE: A Autora (2021).

3.1 ANÁLISE DE RISCO – RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI)

A análise através do Risco Global de Impacto (RGI) foi desenvolvida por meio da combinação dos métodos FMEA e LCI, adicionalmente, as referências e os dados utilizados foram adaptados/modificados para utilização em um empreendimento hidrelétrico. A FIGURA 3.2 apresenta um fluxograma com as etapas percorridas durante o desenvolvimento e aplicação do Método RGI.

FIGURA 3.2 – MÉTODO DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO – ETAPAS DE APLICAÇÃO



FONTE: A Autora (2021).

A descrição e as modificações realizadas em cada etapa do método RGI são apresentadas na sequência:

- Etapa 1 – Definição do objetivo: etapa desenvolvida considerando as referências dos métodos FMEA e LCI, que indicam a determinação do escopo ou objetivo da análise de risco. A limitação do escopo é importante para o estabelecimento de questões que são consideradas e as abordagens que a equipe realiza durante a análise.

- Etapa 2 – Definição da equipe: etapa considerada similarmente nos métodos FMEA e LCI, correspondendo a definição de uma equipe multidisciplinar e multifuncional para o desenvolvimento da análise.
- Etapa 3 – Caracterização do empreendimento: Corresponde à análise do empreendimento, através da interpretação de projetos, análise de documentos e realização de uma visita técnica. Nesta etapa é realizada a segmentação do empreendimento, definição das estruturas para a análise de risco e apresentação da função de cada estrutura.
Esta etapa é norteadada pelo método FMEA, todavia, o método LCI também indica a caracterização do empreendimento e a realização de uma inspeção técnica durante a 2ª etapa dos estudos do método.

- Etapa 4 – Caracterização do vale a jusante: Esta etapa corresponde a caracterização do vale a jusante, desenvolvida com o apoio dos estudos de ruptura realizados para o Plano de Ação de Emergência (PAE) do empreendimento em 2019, que apresentam no relatório as manchas de inundação e as áreas afetadas a jusante do barramento.

A etapa 4 foi desenvolvida através da combinação de etapas do método LCI, relacionadas à estimativa da vazão de pico, ao tempo de chegada da vazão de pico, ao hidrograma de cheia, à propagação do hidrograma no vale a jusante e à caracterização do vale a jusante.

O método LCI indica a caracterização do vale a jusante em duas etapas, para o vale próximo (até 5 km) e para o vale distante (até 30 km). Nesta análise de risco, o critério de caracterização do vale a jusante será a extensão máxima da mancha de inundação verificada no PAE, relacionada a ruptura e ao TR de 10 000 anos.

A combinação de etapas do método LCI foi realizada considerando que o conhecimento das regiões atingidas é consequência de um estudo de ruptura, sendo as vazões de pico, hidrograma de cheia e a propagação do hidrograma no vale a jusante são etapas realizadas durante o estudo, onde as manchas de inundação e as áreas afetadas são parte do resultado.

- Etapa 5 – Desenvolvimento e aplicação do método: O método foi processado através de planilhas convencionalmente utilizadas no FMEA, iniciado pela definição dos modos de falha em cada estrutura de análise. Os modos de falha foram classificados através de três (3) aspectos, sendo: probabilidade de ocorrência, severidade de seus efeitos e probabilidade de detecção.

A classificação de ocorrência, severidade e detecção não foi realizada através de tabelas convencionalmente empregadas no método FMEA, tendo em vista que estas tabelas apresentam valores de probabilidade de ocorrência de modos de falha, classificações de 1 a 10, classificações relacionadas ao estado limite último e/ou não apresentam descrições aderentes a engenharia de barragens.

As modificações efetuadas nas tabelas de classificações foram realizadas com o objetivo de apresentar descrições aderentes a engenharia de barragens e facilitar a classificação com o auxílio de cores e redução do número de classes. A tabela de classes de probabilidade de ocorrência foi modificada substituindo os valores em porcentagem pela descrição de aspectos que são observados através de uma inspeção técnica ao empreendimento e análise da documentação disponível, os quais tem influência na ocorrência dos modos de falha. Essa modificação foi realizada considerando a complexidade de determinar a probabilidade (taxa) de ocorrência de um modo de falha em uma estrutura geotécnica ou de concreto, afinal não se dispõe de bibliografia técnica, ensaios, modelos, protótipos ou estudos de caso em número suficiente para comprovar as taxas de probabilidade de ocorrência indicadas.

A tabela de classificação de severidade considera uma referência bibliográfica do FMEA que relaciona a severidade em termos de efeitos, portanto, quando a falha ocorre sem aviso prévio e afeta o desempenho do sistema, requerendo manutenção ou interrupção do funcionamento. Adicionalmente, a tabela também considera o atributo “efeito” do método LCI, que relaciona o indicador/modo de falha com a ruptura total ou parcial do empreendimento. A combinação destas definições em uma tabela permite facilitar a classificação da severidade dos modos de falha em termos de ocorrência com/sem aviso prévio, afetação do desempenho, necessidade de manutenção, interrupção do funcionamento e a relação do modo de falha com o estado limite último.

A modificação da tabela de classificação de severidade foi realizada em função de algumas tabelas de referência estarem relacionadas a classificação de consequências do estado limite último, sendo assim, foi identificada uma complexidade na classificação de alguns modos de falha através destas tabelas. Complementarmente, algumas tabelas não foram desenvolvidas para a engenharia de barragens, portanto, não apresentam descrições aderentes para essa finalidade.

As tabelas de classificação da probabilidade de detecção observadas na bibliografia técnica são aderentes às obras civis, todavia, a tabela utilizada para análise deste estudo de caso foi otimizada, reduzindo o número de classificações, incorporando cores e utilizando aspectos de controle e monitoramento normalmente empregados na engenharia de barragens.

Após a classificação dos modos de falha, é efetuado o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR), através da soma dos índices ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D). A Autora considera alguns índices de classificação mais relevantes que outros, sendo a probabilidade de detecção um dos mais importantes, afinal, possibilita a detecção e o controle de um modo de falha. O segundo índice mais importante, de acordo com a Autora, é a severidade dos efeitos, que relaciona as consequências e efeitos de cada modo de falha. No estudo de caso o NPR foi calculado através da Equação 11.

$$\text{NPR} = \text{O} + (2 \times \text{S}) + (3 \times \text{D}) \quad (11)$$

Onde:

O = índice de probabilidade de ocorrência;

S = índice de severidade;

D = índice de probabilidade de detecção.

Os métodos FMEA e LCI são executados através uma abordagem indutiva, que constitui um processo de análise de casos específicos para generalizações, ou seja, iniciam de uma falha particular/indicador, analisando o efeito deste no desempenho do sistema ou estrutura. Essa abordagem não permite relacionar diretamente os modos de falha com o estado limite último do empreendimento. De modo a permitir a relação dos modos de falha com o estado limite último e

o impacto a jusante, foram considerados dois aspectos adicionais no Número de Prioridade de Risco, o Índice Global de Impacto (IGI) e a Categoria de Risco (CRI).

O Índice Global de Impacto (IGI) é referente ao impacto a jusante relacionado a perda potencial de vidas humanas e as perdas econômicas, segundo o método LCI, e a Categoria de Risco (CRI) está relacionada às características técnicas, ao estado de conservação e ao Plano de Segurança de Barragem, de acordo com a prescrição da Política Nacional de Barragens Brasileira.

De modo permitir a consideração do IGI e da CRI com o NPR, houve a necessidade de desenvolvimento de tabelas com valores compatíveis aos adotados nas tabelas de classificação quanto à ocorrência, severidade e detecção. O resultado desta combinação de fatores, através da soma destes índices, gerou a obtenção do Risco Global de Impacto (RGI), conforme é possível observar na Equação 12.

$$RGI = IGI + ICR + NPR \quad (12)$$

Sendo:

IGI = Índice Global de Impacto;

ICR = Índice de Categoria de Risco;

NPR = Número de Prioridade de Risco.

O Número de Prioridade de Risco (NPR) pode variar de 6 até 30 pontos, o Índice de Categoria de Risco (ICR) de 5 a 15 pontos e o Índice Global de Impacto (IGI) de 0 a 28 pontos. A importância de cada índice no valor total do Risco Global de Impacto é de 33% para o NPR, 17% para o ICR e 50% para o IGI, totalizando 100% de 89 pontos.

As Tabelas de Classes de Ocorrência (O), Classes de Severidade (S), Classes de Detecção (D), classificação quanto ao Potencial de Perdas de Vidas humanas (PPV) e Perdas Econômicas (PE) e a Tabela do Índice de Categoria de Risco (ICR) foram desenvolvidas neste estudo de caso, através da combinação de referências bibliográficas, personalização e adaptação do conteúdo para melhor aderência às análises de risco em um empreendimento hidrelétrico.

As Tabelas foram propostas com o objetivo de suprir carências dos métodos FMEA e LCI quando aplicados em obras civis. Adicionalmente, com o propósito de auxiliar as equipes técnicas na convergência de classificações de modos de falha durante o processo de análise de risco. As Tabelas propostas serão apresentadas no Capítulo 4.

- ETAPA 6 – Resultado: corresponde ao resultado da análise, interpretação e diagnóstico do risco relacionado à segurança do empreendimento.

Algumas referências do método FMEA apresentam como resultado uma matriz de criticidade ou também chamada matriz de risco. Apenar de ser um resultado visualmente interessante, normalmente é uma matriz bidimensional e não incorpora a probabilidade de detecção, índice que a Autora considera mais relevante para análise. Por esse motivo, em busca de um diagnóstico mais objetivo do risco, houve a necessidade de incorporar um índice que permitisse a classificação do empreendimento através de uma tabela de análise de risco, denominado como Risco Global de Impacto (RGI).

A avaliação do risco do empreendimento é realizada através de uma tabela de classificação, por meio do valor do RGI atribuído a cada modo de falha. A tabela permite classificar cada modo de falha em risco mínimo ao risco extremo, sendo as classificações relacionadas às descrições referentes a ações mitigadoras, atendimento de critérios de projeto, operação, manutenção ou medidas de controle.

O diagnóstico do risco relacionado à segurança do empreendimento é efetuado por meio da classificação da maioria dos modos de falha em risco mínimo ao risco máximo.

3.2 ANÁLISE DE RISCO – ÁRVORE DE FALHAS

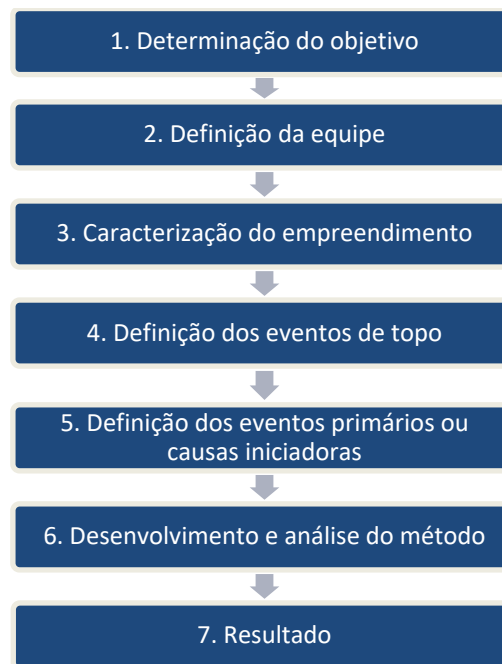
A Árvore de Falhas corresponde a uma análise de risco realizada através de uma abordagem dedutiva, portanto, é iniciada pela ocorrência do estado limite último de um sistema e posteriormente são identificados os eventos que geram essa ocorrência.

Para o entendimento de análises de risco é importante o conhecimento de distintas abordagens, de forma clarificar a determinação de modos de falha,

indicadores e eventos, assim como efetuar assertivamente as classificações. Por esse motivo, a Árvore de Falhas foi um dos métodos escolhidos para a realização da análise de risco.

A FIGURA 3.3 apresenta um fluxograma com as etapas percorridas durante o processo de análise de risco, através da metodologia de Árvore de Falhas (FTA).

FIGURA 3.3 – MÉTODO DE ÁRVORE DE FALHAS – ETAPAS DE APLICAÇÃO



FONTE: A Autora (2021).

Na sequência são apresentadas as etapas seguidas durante o processo de análise de risco, através de método Árvore de Falhas (FTA). As etapas 1, 2 e 3 são similares às apresentadas durante o processo de análise através do método RGI, portanto, não serão apresentadas novamente.

– Etapa 4 – Definição dos eventos de topo: Esta etapa se refere a determinação de eventos indesejáveis. O evento de topo pode ser considerado como a perda de funcionalidade, colapso do sistema ou estado limite último.

É possível a consideração de apenas um evento de topo para todo o empreendimento, no entanto, possivelmente a análise será muito complexa. Para diminuir a complexidade das análises, reduzir o número de ramificações, evitar a necessidade de elementos de transferência, e não necessitar de um

software para o processamento de dados é possível a compartimentação do empreendimento em estruturas e em mais de um evento de topo.

Para o estudo de caso foram considerados dois eventos de topo por estrutura, sendo os eventos indesejáveis adotados em acordo com os estados limites últimos apresentados nos Itens 2.8 e 2.9.

– Etapa 5 – Definição dos eventos primários ou causas iniciadoras: os eventos primários não requerem mais desenvolvimento ou expansão adicional, sendo que a combinação destes gera os eventos intermediários e, consequentemente, o evento de topo.

A análise de risco através do método FTA pode ser realizada qualitativamente ou quantitativamente. A análise qualitativa permite o diagnóstico de eventos primários e rotas de falha (através de eventos intermediários e operadores) que geram a ocorrência de um evento indesejável. Todavia, a análise quantitativa permite aferir a probabilidade de ocorrência de eventos indesejados através da contribuição da probabilidade de eventos primários ou causas iniciadoras.

O maior desafio de análises quantitativas, relacionadas à engenharia de barragens, consiste na obtenção de probabilidade de ocorrência de falhas/eventos. Há muitos trabalhos que realizam análises probabilísticas, todavia, não é escopo deste.

O processo de análise de risco através do método RGI foi realizado qualitativamente, fato que motivou a realização do processo de análise de risco através do método FTA de modo semiquantitativo, indicando valores de probabilidade para os eventos primários.

A definição da probabilidade de ocorrência dos eventos primários foi realizada considerando dados bibliográficos do método FMEA, que apresentam tabelas com classes de probabilidade de ocorrência com valores em porcentagem. De modo a permitir a classificação dos eventos, foi desenvolvida uma tabela com valores de probabilidade e a correspondência destes com uma descrição aderente à engenharia de barragens, relacionada a realização de estudos, análises, testes, investigações, ensaios e/ou manutenção frequente.

Os valores em porcentagem são dados de entrada para o *software* escolhido e utilizado no processo de análise de risco FTA, no entanto, a classificação

dos eventos primários/causas iniciadoras será realizada predominantemente pela descrição indicada na tabela.

Em função da não comprovação técnica dos valores em porcentagem e da não utilização de métodos estatísticos, o método não pode ser considerado como quantitativo, foi denominado como semiquantitativo, justificado pelos valores de probabilidade e *software* de cálculo utilizado.

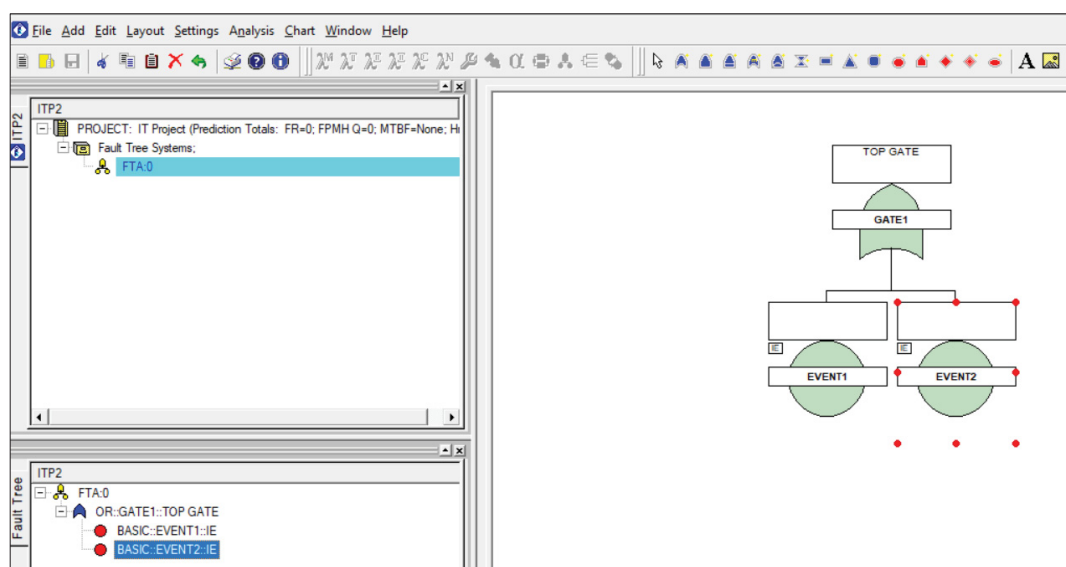
– Etapa 6 – Desenvolvimento e análise do método: O método FTA é processado através de operadores lógicos que conectam eventos de saída com eventos de entrada.

Em algumas situações específicas não é possível realizar uma Árvore de Falhas em uma etapa única ou determinado ramo da análise pode ser empregado em zonas distintas, solicitando a utilização de elementos de transferências ou também chamados de elementos de ligação.

De modo facilitar o processo de análise de risco através de Árvore de Falhas, foi utilizado um *software* no processo, denominado *ITEM ToolKit*, que permitiu a realização dos cálculos de probabilidade de forma eficiente.

O módulo FTA do *Item Software* possui uma área de trabalho onde todos os dados e gráficos do projeto são inseridos. A área de trabalho apresenta uma interface que permite ao usuário criar e mover eventos e operadores lógicos.

FIGURA 3.4 – FTA – ITEM SOFTWARE – ÁREA DE TRABALHO



FONTE: A Autora (2021).

O *Item Software* permite a inserção de distintos modelos de falha, baseados em tempo, modelos mais sofisticados com reparo ou espera e modelos baseados na demanda. Para o estudo de caso foi utilizado um modelo que indica indisponibilidade de eventos que não variam com o tempo e é frequentemente utilizado para representar a probabilidade de falha por demanda, denominado como fixo (fixed).

A probabilidade de ocorrência do evento principal (Q) no *Item Software* pode ser calculado através de abordagens como *Esary-Proschan* ou *Rare*. O *Esary-Proschan* é similar ao cálculo de diagramas de blocos em série (operador OU) e paralelo (operador E), e o *Rare* considera os operadores lógicos “OU” e “E” como soma e multiplicação, respectivamente. A principal diferença entre os métodos de cálculo é observada no operador lógico “OU”, conforme é possível observar nas Equações 13 e 14.

$$\text{Esary-Proschan: } P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B) \quad (13)$$

$$\text{Rare: } P(A + B) = P(A) \times P(B) \quad (14)$$

Sendo:

$P(A + B)$ = probabilidade de A ou B ocorrer;

$P(A)$ = probabilidade de ocorrer A;

$P(B)$ = probabilidade de ocorrer B.

– Etapa 6: Resultado: O principal resultado da Árvore de Falhas é a probabilidade de ocorrência do evento principal (topo) ou indisponibilidade do sistema em um momento específico, apresentado no *software* pela simbologia Q (t).

A frequência de falha (w) indica a frequência por hora ou unidades usadas durante a vida do sistema, no entanto, não será considerada neste estudo de caso, entendendo que não é um aspecto utilizado em obras civis.

Adicionalmente, o *software* permite a avaliação de medidas de importância, através do impacto de um evento em um sistema, por meio de possibilidades como *Fussell-Vesely* ou *Birbaum* – cada uma com sua própria abordagem de importância, com um número sem unidade de 0 a 1, sendo 1 para o evento mais importante.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento das análises de risco e os resultados obtidos no estudo de caso serão apresentados nos itens a seguir.

4.1 RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI)

O processo de análise de risco através do Risco Global de Impacto (RGI) foi realizado em seis (6) etapas, sendo o desenvolvimento de cada etapa apresentado nos itens subsequentes.

4.1.1 Etapa 1 – Determinação do Objetivo

Identificar o risco envolvido relacionado à segurança da barragem de concreto e do canal de adução de um empreendimento. Para a realização de uma análise de risco completa, seria importante analisar principalmente as estruturas do barramento e o canal de adução – em função das áreas afetadas próximas desta estrutura. Todavia, para este estudo de caso foram selecionadas apenas duas estruturas: uma estrutura plenamente geotécnica (canal de adução) e uma estrutura de concreto (vertedouro de soleira livre).

4.1.2 Etapa 2 – Definição da Equipe

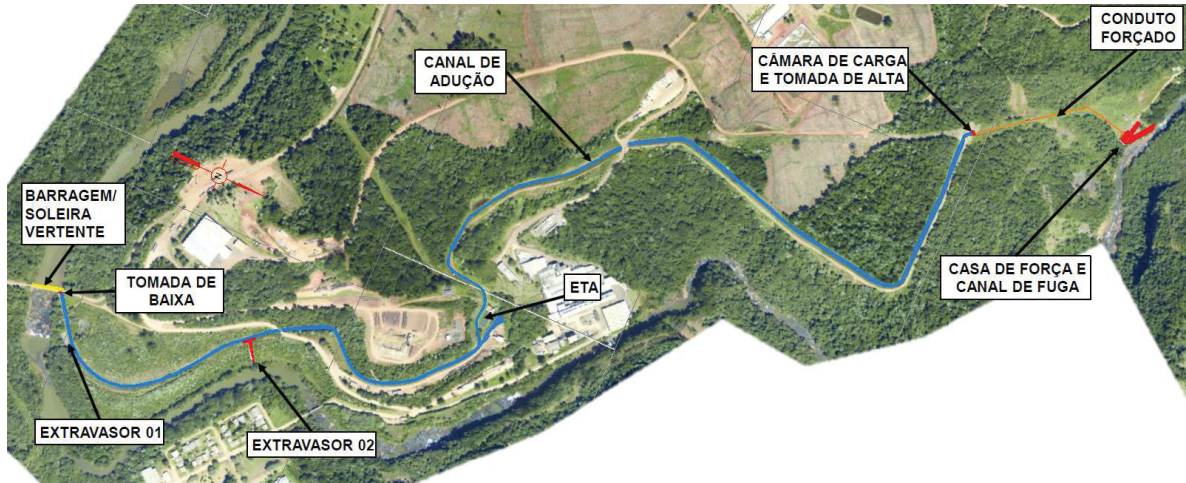
Considerando o objetivo da análise de risco, a equipe multidisciplinar é composta por 1 engenheiro responsável pela área de geotecnia e geologia, 1 engenheiro responsável pela área de hidráulica e 1 engenheiro responsável pela área de estruturas.

4.1.3 Etapa 3 – Caracterização das Estruturas

O arranjo geral do empreendimento é composto por uma barragem de soleira vertente, localizada no leito do rio, conectada na sua margem esquerda por um circuito de adução composto por uma tomada de água de baixa pressão e de um canal de adução a céu aberto. No final do canal que se tem o início do circuito de geração,

composto por uma câmara de carga, tomada de água de alta pressão, a partir da qual há um conduto forçado metálico, exposto, que alimenta duas turbinas na casa de força. A jusante da casa de força o escoamento é restituído ao leito do rio através do canal de fuga. O arranjo geral do empreendimento é apresentado na FIGURA 4.1.

FIGURA 4.1 – ARRANJO GERAL ESQUEMÁTICO

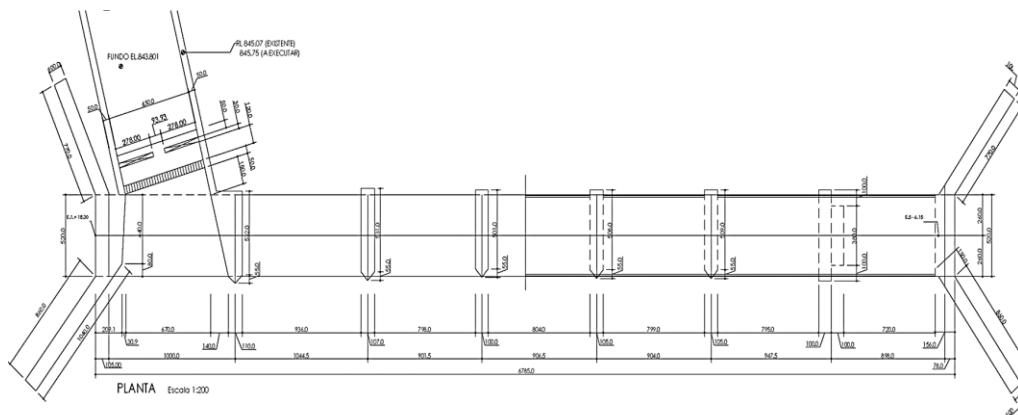


FONTE: PSB, 2019.

- Vertedouro: estrutura a gravidade, blocos de rocha com argamassa, altura máxima de 5,50 m, comprimento do coroamento de 68,0 m, fundação em rocha basáltica, soleira livre, com capacidade de descarga de 430,00 m³/s (TR=100 anos). A planta do vertedouro, as seções longitudinal e transversal podem ser observadas na FIGURA 4.2, FIGURA 4.3 e FIGURA 4.4.

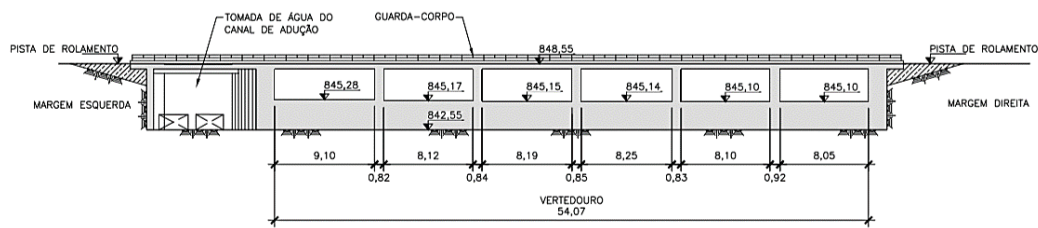
Função: Extravasar vazões.

FIGURA 4.2 – VERTEDOURO – PLANTA



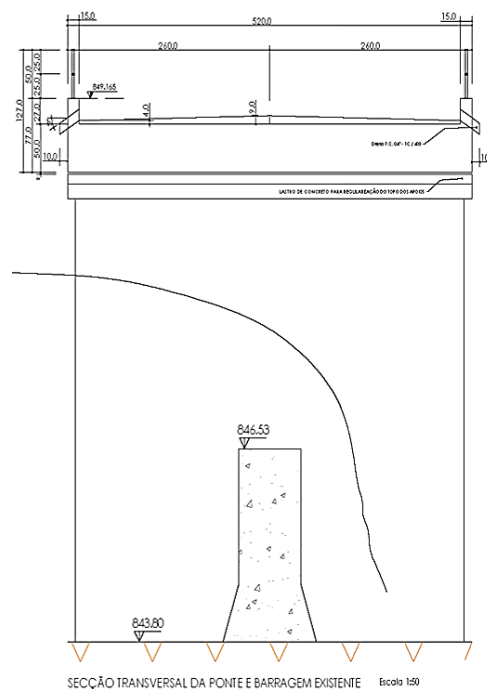
FONTE: PSB (2019).

FIGURA 4.3 – VERTEDOURO – SEÇÃO LONGITUDINAL



FONTE: PSB (2019).

FIGURA 4.4 – EXTRAVASOR/VERTEDOURO – SEÇÃO TRANSVERSAL



FONTE: PSB (2019).

- Tomada de baixa pressão: posicionada na lateral esquerda do barramento, sendo controlada por uma comporta plana com acionamento remoto.

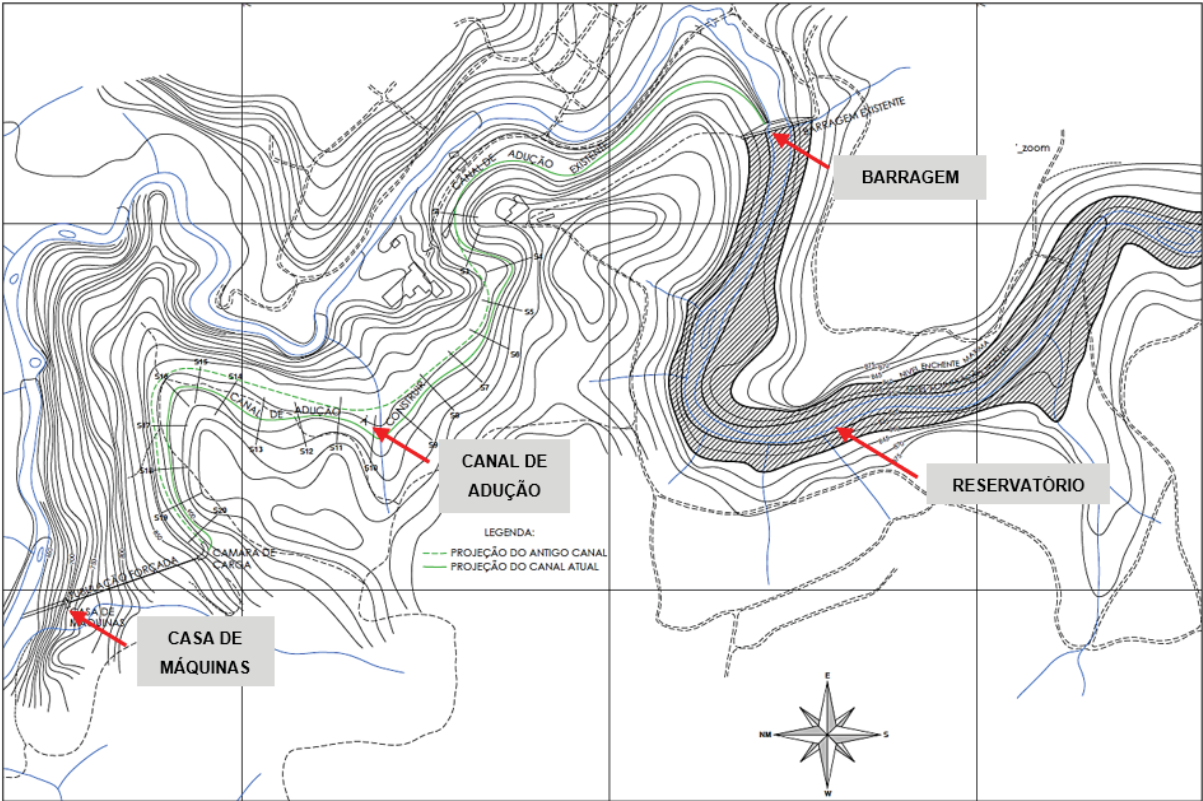
Função: conduzir e controlar o fluxo para o canal de adução.

- Canal de adução: escavado em solo residual de basalto, com trechos revestidos em rocha argamassada. Trechos escavados em solo, sem tratamento, com 3,0 m de largura de base e inclinação dos taludes de 1,5H:1V. Trechos revestidos em rocha argamassada em seção retangular com 1,27 m de largura de base e 6,5 m de altura. O canal possui 2.800,00 m de

comprimento total, com dois extravasores de concreto em soleira vertente. O arranjo geral do canal de adução e as seções transversais típicas são apresentadas na FIGURA 4.5 e FIGURA 4.6.

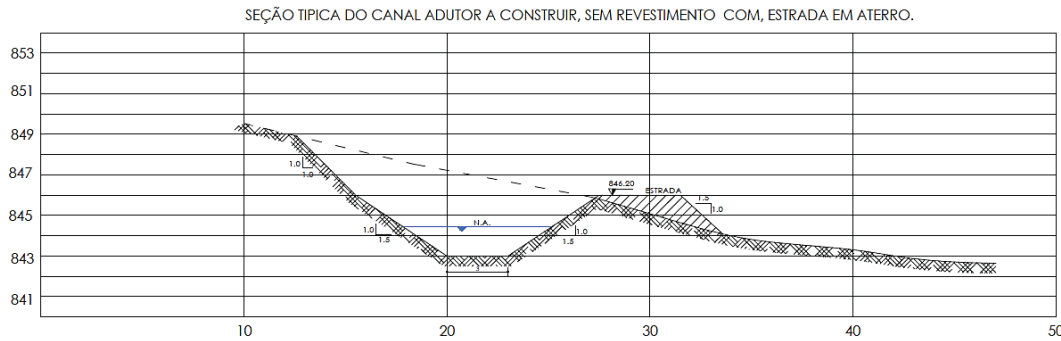
Função: conduzir o fluxo para a tomada de água de alta pressão.

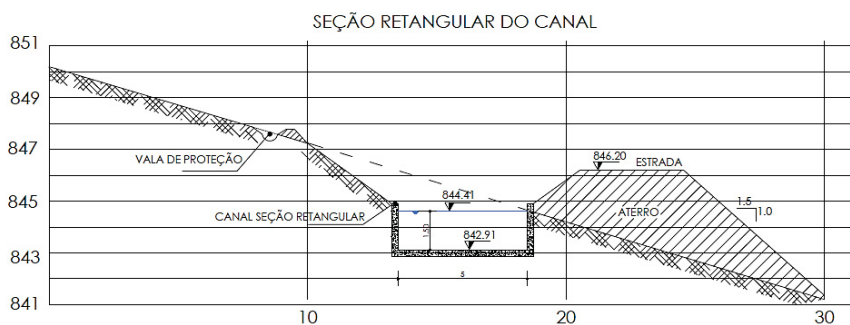
FIGURA 4.5 – CANAL DE ADUÇÃO – ARRANJO GERAL – PLANTA



FONTE: Projeto executivo (2000).

FIGURA 4.6 – CANAL DE ADUÇÃO – SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS





FONTE: Projeto executivo (2000).

4.1.4 Etapa 4 – Caracterização do Vale a Jusante

A caracterização do vale a jusante foi desenvolvida através dos estudos de ruptura realizados para elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) do empreendimento em 2019, que apresentam as manchas de inundação em situação de ruptura do barramento.

Através do PAE foram analisadas informações relacionadas à vazão de pico, ao tempo de chegada da vazão de pico, ao hidrograma de cheia e à propagação do hidrograma no vale a jusante. O estudo de ruptura foi realizado através do *software* *HEC-RAS 5.0.3*, contemplando a simulação de desenvolvimento de uma brecha de ruptura e do hidrograma efluente da mesma, assim como o processo de propagação da cheia ao longo do vale.

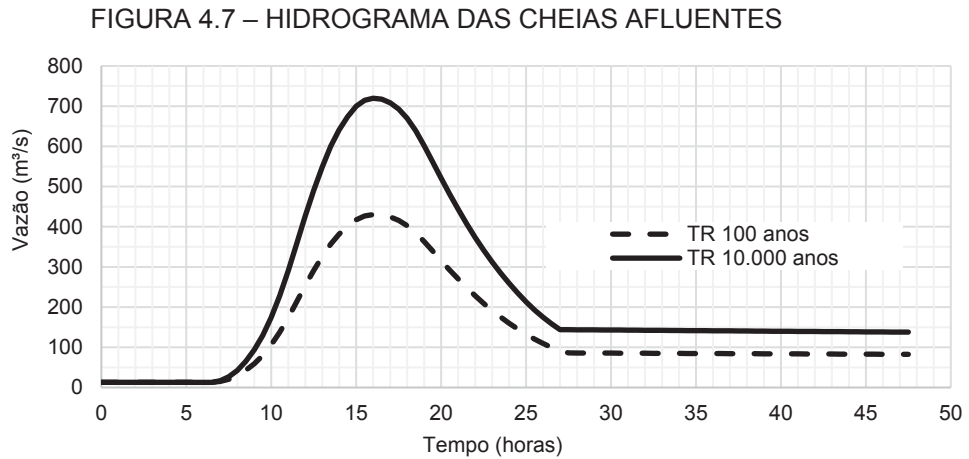
A TABELA 4.1 apresenta o pico das cheias resultantes do modelo utilizado para a definição dos hidrogramas, adotados para o estudo de definição dos mapas de inundação. Os valores de pico resultantes são muito semelhantes aos picos das vazões máximas definidas para o empreendimento.

TABELA 4.1 – TEMPO DE RECORRÊNCIA E PICO DA CHEIA AFLUENTE

Tempo de Recorrência (anos)	Pico da cheia afluyente (m³/s)	Tempo de Recorrência (anos)	Pico da cheia afluyente (m³/s)
2	163,9	50	385,3
5	235,1	100	430,3
10	282,0	1.000	576,0
25	341,6	10.000	719,7

FONTE: Plano de Ação de Emergência (2019).

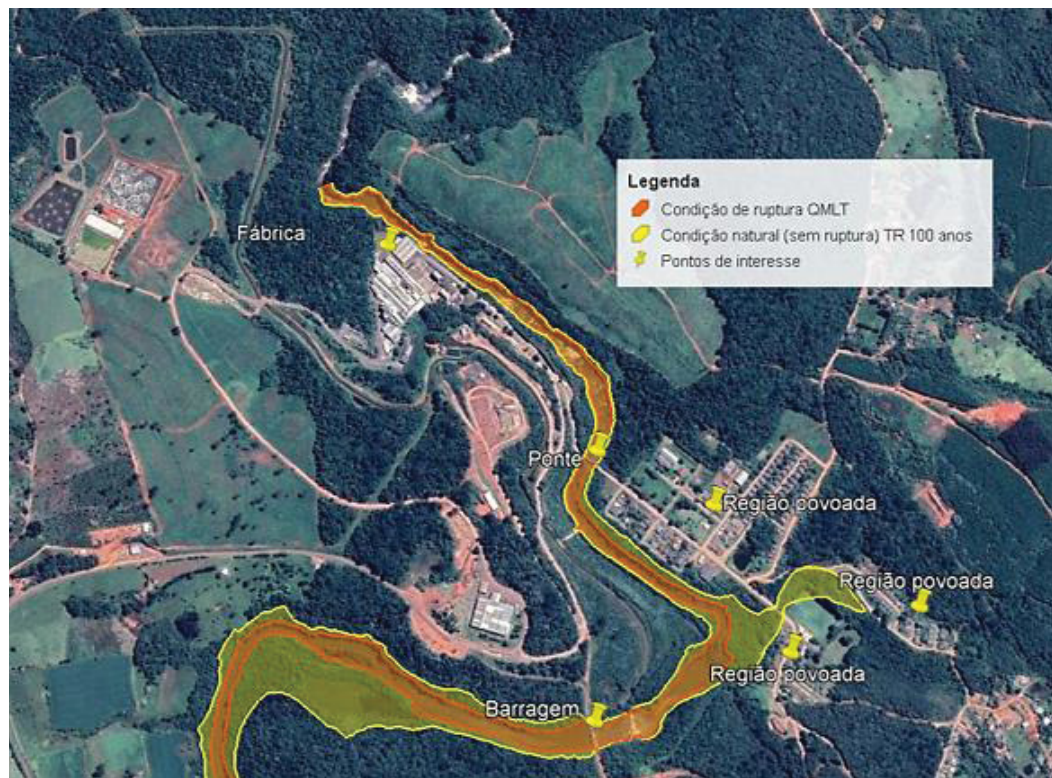
A FIGURA 4.7 apresenta os hidrogramas das cheias afluentes correspondentes aos tempos de recorrência de 100 anos e 10.000 anos.



FONTE: Plano de Ação de Emergência (2019).

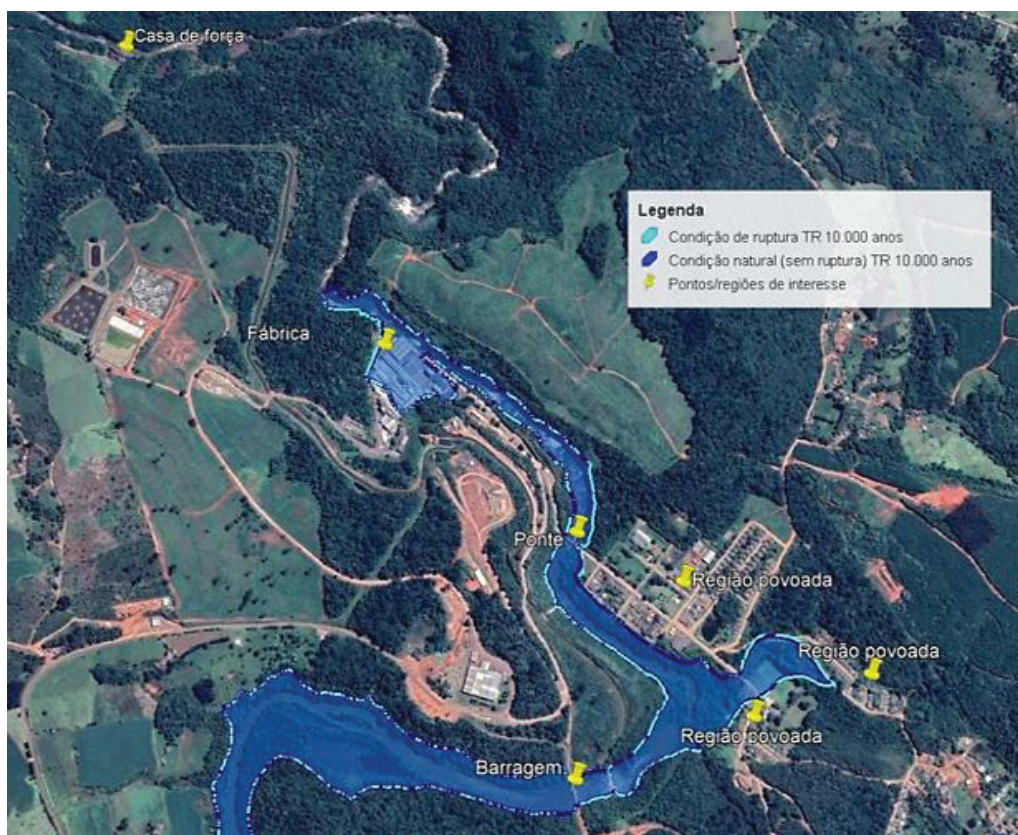
A FIGURA 4.8 e a FIGURA 4.9 apresentam os mapas de inundação para as condições natural e com ruptura, de acordo com o PAE do empreendimento.

FIGURA 4.8 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA CONDIÇÃO NATURAL (TR 100 ANOS) E DA CONDIÇÃO COM RUPTURA Q_{MLT}



FONTE: Plano de Ação de Emergência (2019).

FIGURA 4.9 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA CONDIÇÃO NATURAL (TR 10.000 ANOS) E DA CONDIÇÃO COM RUPTURA (TR 10.000 ANOS)



FONTE: Plano de Ação de Emergência (2019).

As áreas afetadas, a jusante do barramento, correspondem à vegetação/habitat natural, uma vila residencial (zona residencial), uma fábrica (área industrial) e uma ponte (via de comunicação). A FIGURA 4.10 apresenta as áreas afetadas no vale a jusante do barramento.

FIGURA 4.10 – CARACTERIZAÇÃO DO VALE A JUSANTE – ÁREAS AFETADAS



FONTE: Google Earth (2021).

4.1.5 Etapa 5 – Desenvolvimento e Aplicação do Método

O desenvolvimento do método foi realizado indicando os modos potenciais de falha, classificação segundo a probabilidade de ocorrência, severidade dos efeitos e probabilidade de detecção. Nesta etapa também foi realizado o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR) e o cálculo do Risco Global de Impacto (RGI).

Os modos potenciais de falha de cada estrutura foram considerados de acordo com as principais anomalias apresentadas na FIGURA 2.3 e na FIGURA 2.7, todavia, estados limites últimos não foram considerados como um modo potencial de falha.

As tabelas de classificações de probabilidade de ocorrência, severidade dos efeitos e probabilidade de detecção foram personalizadas para o estudo de caso.

A Tabela de Probabilidade de Ocorrência (TABELA 4.2) apresenta classes de 1 a 5, sendo utilizada a cor azul para ocorrência improvável e a vermelha para ocorrência frequente, relacionadas a aspectos que contribuem com a ocorrência de modos de falha.

TABELA 4.2 – CLASSES DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

CLASSE DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (O)	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	DESCRIÇÃO
1	Improvável	<ul style="list-style-type: none"> – Modo de falha não identificado/detectado; – São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios frequentes; – Manutenção frequente, evidente e registrada em relatórios.
2	Remota	<ul style="list-style-type: none"> – Há possibilidade de ocorrência do modo de falha; – São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; – Manutenção pouco frequente, registrada em relatórios.
3	Ocasional	<ul style="list-style-type: none"> – Modo de falha identificado em estágio reduzido; – São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; – Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.
4	Provável	<ul style="list-style-type: none"> – Modo de falha identificado em estágio moderado; – Há reduzidos resultados de estudos, análises, testes, investigações ou ensaios; – Manutenção rara, somente após inspeções obrigatórias ou solicitação da ANEEL/ANA.
5	Frequente	<ul style="list-style-type: none"> – Modo de falha identificado em estágio avançado; – Não são realizados estudos, análises, testes, investigações ou ensaios; – Manutenção não realizada. Situação de abandono.

FONTE: A Autora (2021).

A Tabela de Severidade (TABELA 4.3) apresenta classes de 1 a 5, sendo utilizada a cor azul para nenhum efeito e vermelha para efeito perigoso, relacionadas a afetação no desempenho da estrutura/empreendimento quanto há ocorrência dos modos de falha, impactos ou prejuízos e, adicionalmente, a necessidade de manutenção ou acionamento do PAE.

TABELA 4.3 – CLASSES DE SEVERIDADE

CLASSE DE SEVERIDADE (S)	EFEITO	DESCRIÇÃO
1	Nenhum	<ul style="list-style-type: none"> – A ocorrência do modo de falha não afeta o desempenho da estrutura/empreendimento; – Não há impactos ou prejuízos; – Não há necessidade de manutenção.
2	Reduzido	<ul style="list-style-type: none"> – A ocorrência do modo de falha afeta minimamente o desempenho da estrutura/empreendimento. – Não há impactos ou prejuízos; – Manutenção recomendada.
3	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> – A ocorrência do modo de falha afeta o desempenho da estrutura/empreendimento; – Impactos ou prejuízos reversíveis a curto prazo; – Manutenção necessária.
4	Muito alto	<ul style="list-style-type: none"> – A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura/empreendimento; – Impactos ou prejuízos reversíveis a longo prazo; – Manutenção deve ser realizada com urgência.
5	Perigoso	<ul style="list-style-type: none"> – A ocorrência do modo de falha pode gerar ruptura/instabilidade, sem aviso prévio. – Impactos ou prejuízos irreversíveis; – Acionamento do Plano de Ação de Emergência (PAE).

FONTE: A Autora (2021).

A Tabela de Detecção (TABELA 4.4) apresenta classes de 1 a 5, sendo utilizada a cor azul para probabilidade alta de detecção e vermelha para improvável detecção, relacionadas a capacidade dos controles atuais detectarem os modos de falha.

TABELA 4.4 – CLASSES DE DETECÇÃO

CLASSE DE DETECÇÃO (D)	PROBABILIDADE DE DETECÇÃO	DESCRIÇÃO
1	Muito alta	<ul style="list-style-type: none"> – Controles atuais são capazes de detectar o modo de falha; – Instrumentos de auscultação na estrutura; – Inspeções frequentes documentadas; – Monitoramento de estações fluviométricas/pluviométricas; – Manutenção/ensaios/testes frequentes.
2	Alta	<ul style="list-style-type: none"> – Probabilidade alta dos controles atuais detectarem o modo de falha; – Instrumentos de auscultação na estrutura; – Inspeções pouco frequentes; – Monitoramento de estações fluviométricas/pluviométricas; – Manutenção/ensaios/testes ocasionais.
3	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> – Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; – Instrumentos de auscultação na estrutura insuficientes; – Inspeções ocasionais; – Não há monitoramento de estações fluviométricas/pluviométricas; – Manutenção/ensaios/testes ocasionais.
4	Baixa	<ul style="list-style-type: none"> – Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; – Não há instrumentos de auscultação na estrutura; – Inspeções raramente realizadas; – Manutenção/ensaios/testes raramente realizados.
5	Improvável	<ul style="list-style-type: none"> – Não controle disponível no empreendimento para detecção do modo de falha.

FONTE: A Autora (2021).

O Número de Prioridade de Risco foi calculado adotando fatores ponderativos, de acordo com o julgamento da Autora quanto à relevância de cada índice de

classificação. Adotou-se fator 2 e 3, para as classes de severidade dos efeitos e probabilidade de detecção, respectivamente. Para a classe probabilidade de ocorrência não foi utilizado nenhum fator de ponderação.

Além do Número de Prioridade de Risco (NPR), relacionado a priorização dos modos de falha, foi calculado adicionalmente o Risco Global de Impacto (RGI), através da combinação do NPR, Categoria de Risco e Índice Global de Impacto.

Para permitir a combinação da Categoria de Risco e do Índice Global de Impacto com o NPR houve a necessidade de desenvolver classificações (valores) com a mesma ordem de grandeza dos índices ocorrência, severidade e detecção, de forma que os modos de falha não fossem descaracterizados na análise.

Os valores adotados para a classificação da Categoria de Risco são apresentados na TABELA 4.5, sendo a Categoria de Risco do empreendimento obtida através do último Formulário de Segurança de Barragem (FSB) enviado a ANEEL. O empreendimento em questão foi classificado, de acordo com o FSB 2019, como Risco Médio, portanto para o cálculo do RGI será considerado um valor correspondente a 10.

TABELA 4.5 – ÍNDICE DE CATEGORIA DE RISCO

CATEGORIA DE RISCO	ÍNDICE DE CATEGORIA DE RISCO (ICR)
Baixo	5
Médio	10
Alto	15

FONTE: A Autora (2021).

A TABELA 4.6 e a TABELA 4.7 apresentam os valores adotados para a perda potencial de vidas humanas (PPV) e perdas econômicas (PE), sendo o Índice Global de Impacto (IGI) calculado através da soma destes valores. É importante destacar que os valores de classificação foram modificados para que fossem compatíveis com a relevância das classificações ocorrência, severidade e detecção dos modos de falha.

Cabe mencionar que áreas industriais, redes de abastecimento, áreas agrícolas e habitats naturais não consideram potencial de perdas de vidas humanas. As áreas destacadas (cor roxa) na TABELA 4.6 e na TABELA 4.7 indicam as regiões a jusante afetadas, de acordo com as informações apresentadas na etapa anterior do

método (ETAPA 4), e resultam em um Índice Global de Impacto (IGI) igual a 10 (PPV=3; PE=7).

TABELA 4.6 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO POTENCIAL DE PERDAS DE VIDAS HUMANAS E PERDAS ECONÔMICAS

TIPO 1 – ZONAS RESIDENCIAIS			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	Nº DE HABITAÇÕES AFETADAS	PPV	PE
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 15	1	1
Média	16 a 50	2	2
Elevada	51 a 250	3	3
Muito Elevada	>250	4	4
TIPO 2 – ZONAS CONSTRUÍDAS NÃO RESIDENCIAIS (ESCOLAS, LOJAS, EMPRESAS)			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	Nº DE PESSOAS AFETADAS	PPV	PE
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 150	1	1
Média	151 a 500	2	2
Elevada	501 a 1000	3	3
Muito Elevada	>1000	4	4
TIPO 3 – VIAS DE COMUNICAÇÃO			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE VIAS AFETADAS	PPV	PE
Nenhuma	-	0	0
Pequena	Estradas municipais	1	1
Média	Estradas e ferrovias secundárias	2	2
Elevada	Estradas e linhas ferroviárias principais	3	3
Muito Elevada	Autoestrada, ferrovias de alta velocidade e aeroportos	4	4
TIPO 4 – ÁREAS RECREATIVAS			
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	Nº DE PESSOAS AFETADAS	PPV	PE
Nenhuma	0	0	0
Pequena	1 a 10	1	1
Média	11 a 50	2	2
Elevada	51 a 100	3	3
Muito Elevada	>100	4	4

FONTE: A Autora (2021).

TABELA 4.7 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO AS PERDAS ECONÔMICAS

TIPO 5 – ÁREAS INDUSTRIAIS		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA INDUSTRIAL	PE
Nenhuma	-	0
Pequena	Artesanal	1
Média	Industria de porte médio	2
Elevada	Perímetros industriais	3
Muito Elevada	Indústrias perigosas	4
TIPO 6 – REDES DE ABASTECIMENTO (ÁGUA, GÁS, ELETRICIDADE)		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA AFETADA	PE
Nenhuma	-	0
Pequena	Local de distribuição	1
Média	Local de origem e distribuição	2
Elevada	Regionais	3
Muito Elevada	Nacionais	4
TIPO 7 – ÁREAS AGRÍCOLAS E HABITATS NATURAIS		
IMPORTÂNCIA DAS PERDAS	TIPO DE ÁREA AFETADA	PE
Nenhuma	Não cultivada	0
Pequena	Pastagens	1
Média	Agricultura dispersa e/ou mata nativa	2
Elevada	Agricultura intensa, habitats naturais e patrimônio nacional	3
Muito Elevada	Habitats protegidos e patrimônio mundial	4

FONTE: A Autora (2021).

A partir dos critérios apresentados, o Risco Global de Impacto (RGI) foi calculado para cada modo potencial de falha conforme e é apresentado na TABELA 4.8 (canal de adução) e na TABELA 4.9 (vertedouro).

TABELA 4.8 – CANAL DE ADUÇÃO – DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE RISCO

IDENTIFICAÇÃO DA OBRA:				EQUIPE RESPONSÁVEL PELA ANÁLISE DE RISCO:										
FASE DA OBRA:				REVISÃO INICIAL:										
CÓDIGO DA ANÁLISE DE RISCO:				DATA DE REVISÃO:										
ANÁLISE DE RISCO														
ID	ESTRUTURA	FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	O	EFEITOS	S	MEDIDAS DE CONTROLE E DETECÇÃO	D	NPR	RISCO GLOBAL DE IMPACTO (NPR + ICR + IGI)	AÇÕES MITIGADORAS	MEDIDA REALIZADA
CA	Canal de Adução	(a) Conduzir o fluxo para a tomada de água de alta pressão	I	Falha na proteção externa dos taludes	-Modo de falha identificado em estágio reduzido; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	3	-A ocorrência do modo de falha afeta minimamente o desempenho da estrutura; -Não há impactos ou prejuízos; -Manutenção recomendada.	2	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ ensaios/testes ocasionais.	3	16	36	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			II	Erosão interna Piping	-Modo de falha não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ ensaios/testes ocasionais.	3	19	39	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			III	Zonas úmidas Surgências de água	-Modo de falha identificado em estágio moderado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaios /testes raramente realizados.	4	24	44	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-

IDENTIFICAÇÃO DA OBRA:				EQUIPE RESPONSÁVEL PELA ANÁLISE DE RISCO:										
FASE DA OBRA:				REVISÃO INICIAL:										
CÓDIGO DA ANÁLISE DE RISCO:				DATA DE REVISÃO:										
				ANÁLISE DE RISCO										
ID	ESTRUTURA	FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	O	EFEITOS	S	MEDIDAS DE CONTROLE E DETECÇÃO	D	NPR	RISCO GLOBAL DE IMPACTO (NPR + ICR + IGI)	AÇÕES MITIGADORAS	MEDIDA REALIZADA
			IV	Superfície de escorregamento local	-Modo de falha não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaios /testes raramente realizados.	4	22	42	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			V	Falha na proteção interna do canal	-Modo de falha identificado em estágio moderado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ ensaios/testes ocasionais.	3	21	41	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			VI	Trincas/fissuras	-Modo de falha não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta minimamente o desempenho da estrutura; -Não há impactos ou prejuízos; -Manutenção recomendada.	2	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ ensaios/testes ocasionais.	3	15	35	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-

IDENTIFICAÇÃO DA OBRA:				EQUIPE RESPONSÁVEL PELA ANÁLISE DE RISCO:										
FASE DA OBRA:				REVISÃO INICIAL:										
CÓDIGO DA ANÁLISE DE RISCO:				DATA DE REVISÃO:										
				ANÁLISE DE RISCO										
ID	ESTRUTURA	FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	O	EFEITOS	S	MEDIDAS DE CONTROLE E DETECÇÃO	D	NPR	RISCO GLOBAL DE IMPACTO (NPR + ICR + IGI)	AÇÕES MITIGADORAS	MEDIDA REALIZADA
					-Modo de falha não identificado/detectado; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaios /testes raramente realizados.	4	22	42	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	
					-Modo de falha identificado em estágio moderado; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta minimamente o desempenho da estrutura; -Não há impactos ou prejuízos; -Manutenção recomendada.	2	-Inspeções ocasionais; -Manutenções ocasionais.	3	17	37	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	
					-Modo de falha não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta o desempenho da estrutura; -Impactos e prejuízos reversíveis a curto prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	3	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaios /testes raramente realizados.	4	20	40	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	

FONTE: A Autora (2021).

No canal de adução os modos de falha denominados como surgências de água, falha na proteção externa dos taludes, falha na proteção interna do canal e vegetação excessiva foram identificados durante uma inspeção realizada no empreendimento em 2019. Adicionalmente, análises, testes, ensaios ou manutenção não são realizados com frequência. Esses aspectos indicados contribuem com a ocorrência e progressão dos modos de falha, fato que gerou classificação alta quanto a probabilidade de ocorrência (O).

Os modos de falha que afetam severamente o desempenho da estrutura, causando impactos ou prejuízos, e indicam a necessidade de manutenção são: erosão interna, surgências de água, superfície de escorregamento local, falha na proteção interna do canal e recalques/desalinhamentos. Esses modos de falha foram classificados quanto à severidade de seus efeitos (S) como alta.

Em relação as medidas de controle e detecção (O), os modos de falha denominados como surgências de água, superfície de escorregamento local, recalques ou desalinhamentos e falha entre o maciço em solo e estrutura de concreto foram classificados como probabilidade baixa de detecção. Essa classificação foi realizada em função do empreendimento não possuir instrumentos de auscultação, reduzido número de inspeções e manutenções pouco frequentes.

Classificações altas quanto à ocorrência (O), severidade dos efeitos (S) e detecção resultam em valores maiores do Número de Prioridade de Risco (NPR) e, conseqüentemente, contribuem para um risco maior relacionado à segurança da estrutura.

O Risco Global de Impacto (RGI) para cada modo potencial de falha do vertedouro é apresentado na TABELA 4.9.

TABELA 4.9 – VERTEDOURO – DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE RISCO

EQUIPE RESPONSÁVEL PELA ANÁLISE DE RISCO:														
FASE DA OBRA:														
CÓDIGO DA ANÁLISE DE RISCO:														
ANÁLISE DE RISCO														
ID	ESTRUTURA	FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA	CAUSAS POTENCIAIS MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	O	EFEITOS	S	MEDIDAS CONTROLE E DE DETECÇÃO	D	NP R	RISCO GLOBAL (RG) (NPR + ICR + IGI)	AÇÕES MITIGADORAS	MEDIDA REALIZADA
VT	(a) Extravasas vazões Vertedouro		I	Abertura de juntas	-Há possibilidade de ocorrência do modo de falha; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	3	-A ocorrência do modo de falha afeta o desempenho da estrutura; -Impactos ou prejuízos reversíveis a curto prazo; -Manutenção necessária.	3	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaio/testes raramente realizados.	4	21	41	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			II	Deslocamentos diferenciais	-Há possibilidade de ocorrência do modo de falha; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	3	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos ou prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaio/testes raramente realizados.	4	23	43	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			III	Fissuras ou trincas	-Modo de falha identificado em estágio moderado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta o desempenho da estrutura; -Impactos ou prejuízos reversíveis a curto prazo; -Manutenção necessária.	3	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ensaio/testes ocasionais.	3	19	39	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-

IDENTIFICAÇÃO DA OBRA:					EQUIPE RESPONSÁVEL PELA ANÁLISE DE RISCO:									
FASE DA OBRA:					REVISÃO INICIAL:									
CÓDIGO DA ANÁLISE DE RISCO:					DATA DE REVISÃO:									
					ANÁLISE DE RISCO									
ID	ESTRUTURA	FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA	CAUSAS POTENCIAIS MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	O	EFEITOS	S	MEDIDAS CONTROLE E DE DETECÇÃO	D	NP R	RISCO GLOBAL (RG) (NPR + ICR + IG)	ACÕES MITIGADORAS	MEDIDA REALIZADA
			IV	pela Infiltrações estrutura	-Modo de falha identificado em estágio moderado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta o desempenho da estrutura; -Impactos ou prejuízos reversíveis a curto prazo; -Manutenção necessária.	3	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaio/testes raramente realizados.	4	22	42	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			V	Infiltração/ erosão pela fundação/ ombrias	-Modo de falha identificado em estágio moderado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	4	-A ocorrência do modo de falha afeta severamente o desempenho da estrutura; -Impactos ou prejuízos reversíveis a longo prazo; -Manutenção deve ser realizada com urgência.	4	-Probabilidade baixa dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Não há instrumentos de auscultação na estrutura; -Inspeções raramente realizadas; -Manutenção/ensaio/testes raramente realizados.	4	24	44	-Instalação de instrumentos de auscultação; -Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-
			VI	ou Lixiviação cavitação	-Modo de falha não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	2	-A ocorrência do modo de falha afeta minimamente o desempenho da estrutura; -Não há impactos ou prejuízos; -Manutenção recomendada.	2	-Probabilidade moderada dos controles atuais detectarem o modo de falha; -Inspeções ocasionais; -Manutenção/ensaio/testes ocasionais.	3	15	35	-Inspeções frequentes, com registro em relatório; -Manutenções frequentes.	-

FONTE: A Autora (2021).

No vertedouro os modos de falha denominados como fissuras ou trincas, infiltrações pela estrutura e infiltração pela fundação/ombreiras foram identificados durante uma inspeção realizada no empreendimento em 2019. Adicionalmente, análises, testes, ensaios ou manutenção não são realizados com frequência. Esses aspectos indicados contribuem com a ocorrência e progressão dos modos de falha, fato que gerou classificação alta quanto a probabilidade de ocorrência (O).

Os modos de falha que afetam severamente o desempenho da estrutura, causando impactos ou prejuízos, e indicam a necessidade de manutenção são: deslocamentos diferenciais e infiltração/erosão pela fundação/ombreiras. Esses modos de falha foram classificados quanto à severidade de seus efeitos (S) como alta.

Em relação as medidas de controle e detecção (O), os modos de falha denominados como abertura de juntas, deslocamentos diferenciais, infiltrações pela estrutura e infiltração/erosão pela fundação/ombreiras foram classificados como probabilidade baixa de detecção. Essa classificação foi realizada em função do empreendimento não possuir instrumentos de auscultação, reduzido número de inspeções e manutenções pouco frequentes.

Classificações altas quanto à ocorrência (O), severidade dos efeitos (S) e detecção resultam em valores maiores do Número de Prioridade de Risco (NPR) e, conseqüentemente, contribuem para um risco maior relacionado à segurança da estrutura.

4.1.6 Resultado do Risco Global de Impacto

A análise do risco, relacionada à segurança do empreendimento, foi realizada através do Risco Global de Impacto, com auxílio da TABELA 4.10 que apresenta os valores mínimos e máximos de RGI e o significado das classificações para o responsável técnico do empreendimento.

TABELA 4.10 – CLASSIFICAÇÃO DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO

RISCO GLOBAL DE IMPACTO	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
RGI < 20	Risco mínimo	Nenhuma ação mitigadora necessita ser implantada. Todos os critérios de projeto, operação, manutenção e detecção estão sendo atendidos.
20 < RGI < 40	Risco baixo	É possível implementar medidas mitigadoras para aumentar a segurança e reduzir o risco do empreendimento. A maioria dos critérios de projeto, operação, manutenção e detecção estão sendo atendidos.
40 < RGI < 60	Risco moderado	É recomendável implementar medidas mitigadoras para aumentar a segurança e reduzir o risco do empreendimento. Critérios de projeto, operação, manutenção e detecção estão sendo atendidos ocasionalmente.
60 < RGI < 80	Risco elevado	Devem ser implementadas medidas mitigadoras para aumentar a segurança e reduzir o risco do empreendimento. Critérios de projeto, operação, manutenção e detecção estão sendo atendidos raramente.
RGI > 80	Risco extremo	Medidas mitigadoras devem ser implementadas com urgência. Critérios de projeto, operação, manutenção e detecção não estão sendo atendidos.

FONTE: A Autora (2021).

O resultado da análise de risco do estudo de caso é apresentado na TABELA 4.11, através da classificação dos modos de falha quanto o RGI. A simbologia de representação de cada modo de falha, do canal de adução e vertedouro, é apresentada nas colunas iniciais da TABELA 4.8 e da TABELA 4.9.

TABELA 4.11 – ANÁLISE DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO DO EMPREENDIMENTO

RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI)	CLASSIFICAÇÃO	ANÁLISE DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO DO EMPREENDIMENTO
RGI < 20	Risco mínimo	
20 < RGI < 40	Risco baixo	CA-I; CA-II; CA-VI; CA-VIII; CA-IX

RISCO GLOBAL DE IMPACTO (RGI)	CLASSIFICAÇÃO	ANÁLISE DO RISCO GLOBAL DE IMPACTO DO EMPREENDIMENTO
		VT-III; VT-VI
40 < RGI < 60	Risco moderado	CA-III; CA-IV; CA-V; CA-VII VT-I; VT-II; VT-IV; VT-V
60 < RGI < 80	Risco elevado	
RGI > 80	Risco extremo	

FONTE: A Autora (2021).

Através da análise da TABELA 4.11 foi possível classificar o empreendimento como risco baixo a moderado, portanto, os critérios de projeto, operação, manutenção, detecção estão sendo atendidos ocasionalmente, sendo recomendável a implementação de medidas mitigadoras para aumentar a segurança e reduzir o risco.

Adicionalmente, o método indica alguns modos de falha com Número de Prioridade de Risco maior – surgências de água, superfície de escorregamento, falha na proteção interna do canal, recalques ou desalinhamentos, aberturas de juntas, deslocamentos diferenciais, infiltrações pela estrutura e infiltração/erosão pela fundação – apontando a necessidade de priorização destes na implementação das medidas mitigadoras.

Em uma análise técnica é importante o detalhamento de cada medida mitigadora, de modo direcionar assertivamente o empreendedor na implementação destas ações. Como não é o foco deste trabalho, essas medidas não serão detalhadas.

4.2 ANÁLISE DE RISCO – ÁRVORE DE FALHAS (FTA)

O processo de análise de risco através de Árvore de Falhas foi realizado em sete (7) etapas, sendo o desenvolvimento de cada etapa apresentado nos itens subsequentes.

A Etapa 1 (Determinação do objetivo), a Etapa 2 (Definição da equipe) e a Etapa 3 (Caracterização do empreendimento) são similares às apresentadas para a análise através do Risco Global de Impacto, por esse motivo, não serão apresentadas novamente.

4.2.1 Etapa 4 - Definição dos Eventos de Topo

O evento de topo é considerado como a perda de funcionalidade, o colapso do sistema ou o estado limite último. Para a análise de risco em questão são considerados quatro (4) eventos de topo, sendo dois (2) relacionados ao canal de adução e dois (2) relacionados à estrutura do vertedouro, apresentados nos itens a seguir:

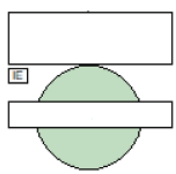
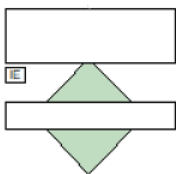
- a) Canal de adução – Instabilidade de talude;
- b) Canal de adução – Galgamento;
- c) Vertedouro – Galgamento;
- d) Vertedouro – Instabilidade da estrutura.

4.2.2 Etapa 5 – Definição dos Eventos Primários ou Causas Iniciadoras

Os eventos primários não requerem mais desenvolvimento ou expansão adicional, sendo que a combinação destes gera os eventos intermediários e, consequentemente, o evento de topo.

Para o estudo de caso foram utilizados o evento primário básico e o evento primário por desenvolver, cujas simbologias foram obtidas através do *Item Software* e são apresentadas na TABELA 4.12.

TABELA 4.12 – SIMBOLOGIA ASSOCIADA A EVENTOS PRIMÁRIOS

EVENTOS PRIMÁRIOS	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
Básico		Evento que não necessita de mais desenvolvimento. Constitui uma causa iniciadora.
Por desenvolver		Evento por desenvolver. Evento similar ao evento básico, no entanto, sua representação é distinta para indicar que poderá ser desenvolvido no futuro.

Fonte: A Autora (2021).

A Árvore de Falhas foi realizada através de uma análise semiquantitativa, portanto, foram definidas taxas de falha para os eventos primários. As taxas de falha e a descrição que auxiliaram a equipe técnica na classificação dos eventos primários são apresentadas na TABELA 4.13, desenvolvida pela Autora.

TABELA 4.13 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	DESCRIÇÃO
0,0001	Improvável	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios frequentes; -Manutenção frequente, evidente e registrada em relatórios.
0,001	Remota	-Há possibilidade de ocorrência do evento; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; -Manutenção pouco frequente, registrada em relatórios.
0,01	Ocasional	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.
0,1	Provável	-Evento ocorreu/identificado ocasionalmente; -Há reduzidos resultados de estudos, análises, testes, investigações ou ensaios. -Manutenção rara, somente após inspeções obrigatórias ou solicitação da ANEEL/ANA.
0,2	Frequente	-Evento ocorre com frequência; -Não são realizados estudos, análises, testes, investigações ou ensaios; -Manutenção não realizada. Situação de abandono.

FONTE: A AUTORA (2021).

Os eventos primários, as taxas de ocorrência e os critérios adotados para as Árvore de Falha do canal de adução são apresentadas na TABELA 4.14 e na

TABELA 4.15. Os valores indicados como “probabilidade de ocorrência” foram inseridos no *Item Software*, cuja simbologia é observada através da letra “Q”.

TABELA 4.14 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE 01 – INSTABILIDADE DE TALUDE – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Carga adicional	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Sismo	-Improável.	0,0001
Rebaixamento rápido do nível de água	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Falha na proteção interna do canal	-Evento ocorre com frequência; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,1
Erosão interna Piping	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Aumento da poropressão	-Há possibilidade de ocorrência do evento; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01
Aumento subpressão/erosão pela fundação	-Há possibilidade de ocorrência do evento; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01
Falha geológica	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001

FONTE: A Autora (2021).

Para o evento primário “sismo” não foi utilizada a descrição apresentada na TABELA 4.13 com referência, por ser um evento de baixa probabilidade de ocorrência no Brasil, portanto, este evento foi indicado como improvável, considerando a probabilidade adotada para os demais eventos primários na Árvore de Falhas 01.

TABELA 4.15 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE 02 - GALGAMENTO - PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Tomada de baixa pressão – Falha estrutural	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Tomada de baixa pressão – Falha mecânica	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Tomada de baixa pressão – Falha elétrica	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Tomada de baixa pressão – Obstrução da comporta	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Extravasor – Falha estrutural	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Extravasor – Obstrução	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001

FONTE: A Autora (2021).

Os eventos primários, as taxas de ocorrência e os critérios adotados para as Árvore de Falha do vertedouro são apresentadas na TABELA 4.16 e na TABELA 4.17. Os valores indicados como “probabilidade de ocorrência” foram inseridos no *Item Software*, cuja simbologia é observada através da letra “Q”.

TABELA 4.16 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 03 – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Subpressão elevada	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Erosão regressiva na fundação	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Perda de base comprimida	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Sismo	-Improável.	0,0001
Falha na interface concreto-rocha	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Planos de fraqueza na fundação	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,0001

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Redução da resistência do material constituinte	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01
Recalque excessivo	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Fissuras ou trincas	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01
Infiltração excessiva	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01
Lixiviação ou carbonatação	-Evento ocorreu/identificado raramente; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios quando há evidência de anomalia ou por questões normativas; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,01

FONTE: A Autora (2021).

TABELA 4.17 – VERTEDOURO/PONTE – GALGAMENTO – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS BÁSICOS

EVENTO PRIMÁRIO	MECANISMOS PARA OCORRÊNCIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (Q)
Sismo	-Improvável.	0,0001
Obstrução da soleira vertente	-Evento não identificado/detectado; -São realizados estudos, análises, testes, investigações e ensaios com frequência reduzida; -Manutenção ocasional, realizada somente quando há evidência de anomalia.	0,001
Cheia superior ao tempo de recorrência de dimensionamento (TR=100 anos)	-Há possibilidade de ocorrência do evento; -Cálculo do risco será realizado através da recomendação da Eletrobrás (2003): T = 1.000 anos n = 50 anos $P = 1 - (1 - \frac{1}{T})^n$	0,05

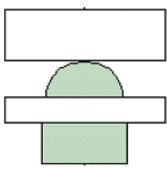
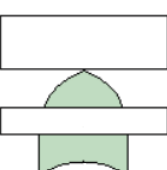


FONTE: A Autora (2021).

Para o evento primário “cheia superior ao tempo de recorrência de dimensionamento” não foi utilizada a descrição apresentada na TABELA 4.13 com referência, em função da Eletrobrás (2003) apresentar o cálculo do risco envolvido na ocorrência deste evento.

4.2.3 Etapa 6 – Desenvolvimento e Análise do Método

A construção da Árvore de Falhas é realizada através de eventos primários, operadores lógicos – que correspondem à eventos intermediários e eventos de topo – e elementos de transferência. Os operadores lógicos e elementos de transferência, utilizados nesta análise de risco, são apresentados na TABELA 4.18.

TABELA 4.18 - SIMBOLOGIA DE OPERADORES LÓGICOS E ELEMENTOS DE TRANSFERÊNCIA

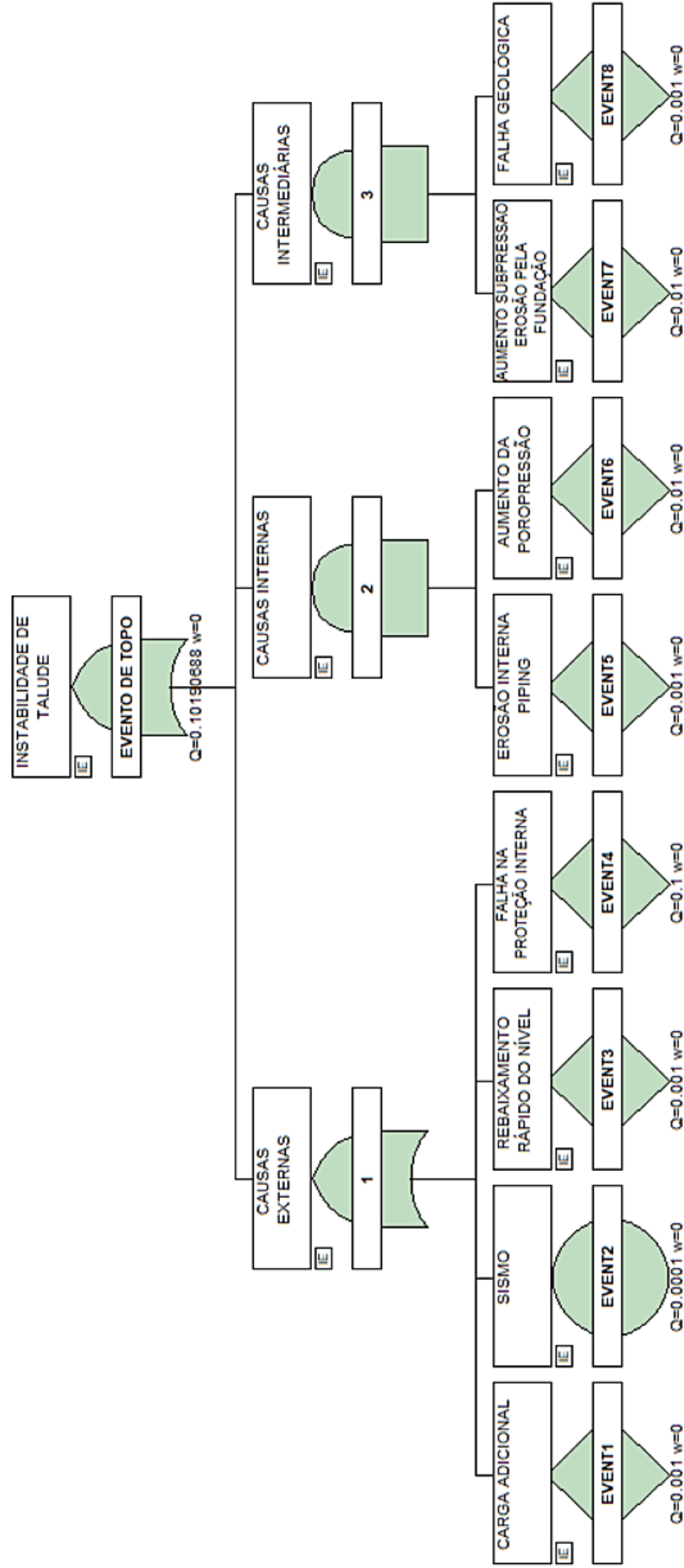
SÍMBOLO	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO
	Porta lógica/operador “E”	O evento de saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Porta lógica/operador “OU”	O evento de saída ocorre se ocorrer pelo menos <u>um</u> dos eventos de entrada.
	Transferência para o interior	Indica que a Árvore de Falhas continua (em outra página) no correspondente símbolo de transferência para o exterior.
	Transferência para o exterior	Indica que a Árvore de Falhas deve ser ligada ao correspondente símbolo de transferência para o interior.

FONTE: A Autora (2021).

Foram desenvolvidas quatro (4) Árvores de Falha, sendo duas para o canal de adução (FIGURA 4.11 e FIGURA 4.13) e duas para o vertedouro (FIGURA 4.15 e FIGURA 4.17), em acordo com os eventos primários e eventos de topo definidos. A probabilidade de ocorrência dos eventos primários (Q), assim como os critérios adotados para a definição, são apresentados na TABELA 4.14 a TABELA 4.17.

O resultado da análise de risco através de Árvore de Falhas é obtido por meio da probabilidade de ocorrência dos eventos de topo, sendo calculada com o *Item Software*.

FIGURA 4.11 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 01 – INSTABILIDADE DE TALUDE



FONTE: A Autora (2021).

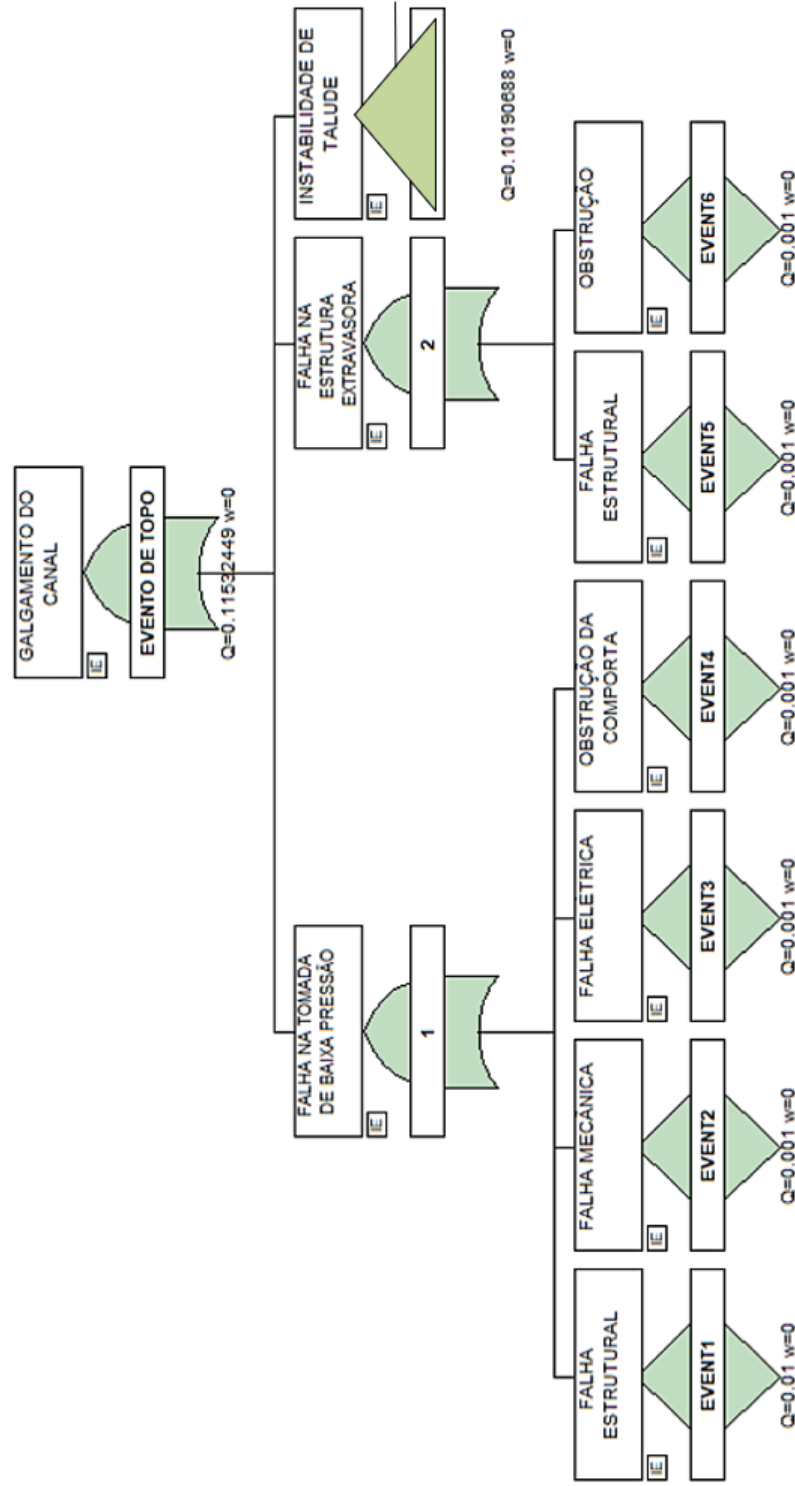
FIGURA 4.12 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 01 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – INSTABILIDADE DE TALUDE

Fault Tree Importance View			
	Event	F-Vesely	BirnBaum
1	EVENT4	0.97924011	1
2	EVENT1	0.0097924011	1
3	EVENT3	0.0097924011	1
4	EVENT2	0.00097924011	1
5	EVENT8	9.7924011e-5	0.01
6	EVENT7	9.7924011e-5	0.001
7	EVENT6	9.7924011e-5	0.001
8	EVENT5	9.7924011e-5	0.01

FONTE: A Autora (2021).

De acordo com as grandezas de importância *F-Vesely* e *BirnBaum*, indicadas no *Item Software*, os eventos 4 (falha na proteção vegetal), 1 (carga adicional), 3 (rebaixamento do nível de água) e 2 (sismo) são os que mais contribuem na efetivação do evento de topo. Exceto o evento 4 (falha na proteção externa), os demais eventos apresentam taxas de falha similares a outros eventos da análise, todavia, a influência maior na efetivação do evento de topo é relacionada ao operador “OU” que conecta os eventos de saída com eventos de entrada.

FIGURA 4.13 – CANAL DE ADUÇÃO – ÁRVORE DE FALHAS 02 – GALGAMENTO



FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 4.14 – CANAL DE ADUÇÃO – GALGAMENTO – ÁRVORE DE FALHAS 02 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA

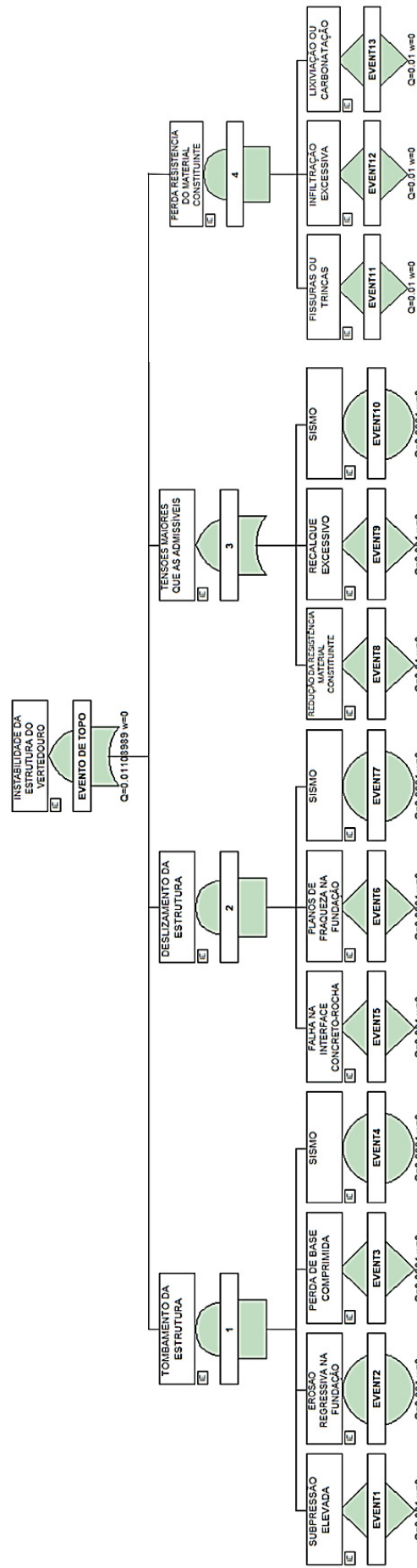
Fault Tree Importance View			
	Event	F-Vesely	BirnBaum
1	TRANSFERÊNCIA	0.87169275	1
2	EVENT1	0.085538165	1
3	EVENT2	0.0085538165	1
4	EVENT3	0.0085538165	1
5	EVENT4	0.0085538165	1
6	EVENT5	0.0085538165	1
7	EVENT6	0.0085538165	1

FONTE: A Autora (2021).

A instabilidade de talude é considerada como um evento de topo na Árvore de Falhas 01, afinal pode gerar a perda de funcionalidade do canal de adução, impossibilitando o direcionamento da vazão de água para a tomada de alta pressão. Todavia, a instabilidade de um talude também pode ocasionar o galgamento do canal de adução, sendo adotada na Árvore 02 como um elemento de transferência.

De acordo com a grandeza de importância *F-Vesely*, indicada no resultado do *Item Software*, os eventos Transferência (instabilidade de talude) e 1 (falha estrutural) são os que mais contribuem na efetivação do evento de topo. Na Árvore de Falhas 02 todos os eventos primários são conectados pelo mesmo operador (OU) e há um elemento de transferência, portanto, a contribuição dos eventos na efetivação do evento de topo é diretamente influenciada pelas taxas de falha indicadas.

FIGURA 4.15 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 03 – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA



FONTE: A Autora (2021).

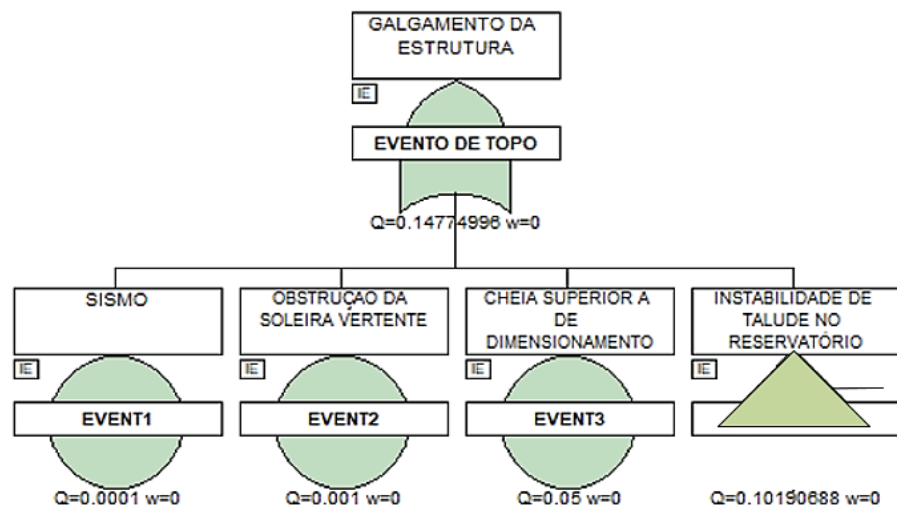
FIGURA 4.16 – VERTEDOIRO – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – INSTABILIDADE DA ESTRUTURA

Fault Tree Importance View			
	Event	F-Vesely	BirnBaum
1	EVENT8	0.90081975	1
2	EVENT9	0.090081975	1
3	EVENT10	0.0090081975	1
4	EVENT13	9.0081975e-5	0.0001
5	EVENT12	9.0081975e-5	0.0001
6	EVENT11	9.0081975e-5	0.0001
7	EVENT5	9.0081975e-10	1e-8
8	EVENT6	9.0081975e-10	1e-7
9	EVENT7	9.0081975e-10	1e-7
10	EVENT1	9.0081975e-13	1e-11
11	EVENT2	9.0081975e-13	1e-11
12	EVENT3	9.0081975e-13	1e-10
13	EVENT4	9.0081975e-13	1e-10

FONTE: A Autora (2021).

Segundo as grandezas de importância *F-Vesely* e *BirnBaum*, apresentadas no resultado do *Item Software*, os eventos 8 (redução da resistência do material constituinte), 9 (recalque excessivo) e 10 (sismo) são os que mais contribuem na efetivação no evento de topo. Assim como indicado na Árvore de Falhas 01, os eventos que mais influenciam na efetivação do estado limite último são os conectados pelo operador “OU”, portanto, as taxas de falha indicadas são menos influentes que a escolha do operador.

FIGURA 4.17 – VERTEDOIRO – ÁRVORE DE FALHAS 04 – GALGAMENTO



FONTE: A Autora (2021).

FIGURA 4.18 – VERTEDOURO – ÁRVORE DE FALHAS 04 – GRANDEZAS DE IMPORTÂNCIA – GALGAMENTO

Fault Tree Importance View			
	Event	F-Vesely	BirnBaum
1	TRANSFERÊNCIA	0.66602809	1
2	EVENT3	0.32678269	1
3	EVENT2	0.0065356538	1
4	EVENT1	0.00065356538	1

FONTE: A Autora (2021).

De acordo com a grandeza de importância *F-Vesely*, indicada no resultado do *Item Software*, os eventos Transferência (instabilidade de talude no reservatório) e 3 (cheia superior à de dimensionamento) são os que mais contribuem na efetivação do evento de topo. Na Árvore de Falhas 03 todos os eventos primários são conectados pelo mesmo operador (OU) e há um elemento de transferência, portanto, a contribuição dos eventos na efetivação do evento de topo é diretamente influenciada pelas taxas de falha indicadas.

4.2.4 Etapa 7 – Resultado da Árvore de Falhas

A avaliação do risco de duas estruturas do empreendimento foi realizada através do desenvolvimento de Árvore de Falhas, indicando a probabilidade de ocorrência de eventos de topo. A probabilidade de ocorrência dos eventos de topo é diretamente relacionada à probabilidade de ocorrência de cada evento primário e às escolhas dos operadores lógicos.

O conceito de operadores lógicos tem influência direta de sistemas elétricos/mecânicos, designados para operação de sistemas em série e em paralelo, por esse motivo a probabilidade de ocorrência dos eventos de topo deve ser interpretada com essa ressalva.

O operador “E” indica uma situação de redundância, o que equivale ao funcionamento de sistemas em paralelo, portanto para que o evento de saída ocorra é necessário que todos os eventos de entrada também ocorram. Todavia, o operador “OU” modela o funcionamento de sistemas em série, assim, o evento de saída ocorre se qualquer evento de entrada também ocorrer, aumentando a probabilidade dos eventos intermediários ou evento de topo.

A probabilidade dos eventos de topo não deve ser entendida como uma probabilidade real de efetivação dos eventos. Para que isso fosse possível, haveria a necessidade de um banco de dados consistente e confiável, com informações e séries históricas que permitissem a confirmação da probabilidade de ocorrência de cada evento básico e sua relação com o estado limite último da estrutura.

Os eventos de topo com probabilidade maior de ocorrência são o galgamento do canal de adução e o galgamento do vertedouro, relacionados à probabilidade de ocorrência de uma instabilidade de talude ou uma cheia relacionada a um tempo de recorrência maior que o de dimensionamento. Adicionalmente, os eventos de entrada estão conectados aos eventos de saída através da porta “OU”, portanto, a ocorrência de qualquer evento de entrada contribui na efetivação do evento de topo.

Eventos de topo, eventos primários e elementos de transferência com taxas maiores de probabilidade devem ser detalhados e analisados tecnicamente. Os resultados devem ser apresentados ao responsável técnico através de ações ou medidas mitigadoras, de modo a reduzir a probabilidade de ocorrência destes eventos e aumentando a segurança das estruturas.

5 CONCLUSÕES

A utilização de métodos de análise de risco na engenharia de barragens é factível e são ferramentas interessantes para o diagnóstico de eventos e modos de falha que podem contribuir com o aumento do risco relacionado à segurança de um empreendimento. Todavia, as ferramentas de análise de risco são frequentemente utilizadas em produtos, processos e tecnologias, por esse motivo, o aporte de documentos bibliográficos nestas áreas é maior. Recentemente, as ferramentas de análise de risco estão ganhando força na engenharia de barragens, aumentando o número de trabalhos na área e a personalização dos métodos, de forma a permitir maior aderência destes na aplicação em obras civis.

O método FMEA se mostrou, neste trabalho, uma ferramenta vantajosa para o mapeamento de modos de falha em um empreendimento hidrelétrico, permitindo a análise da segurança através da classificação dos modos de falha quanto a probabilidade de ocorrência, a severidade dos efeitos, a probabilidade de detecção e quanto ao Número de Prioridade de Risco.

As tabelas de classificação de modos de falha, normalmente empregadas no método FMEA, apresentam categorizações de 1 a 10, classificações relacionadas ao estado limite último ou não apresentam descrições e aspectos convencionalmente utilizados na engenharia de barragens. Esses aspectos motivaram a modificação e personalização das tabelas de classificação durante o processo de análise em duas (2) estruturas de um empreendimento.

As tabelas de classificação modificadas e personalizadas neste trabalho se mostraram mais aderentes que aquelas utilizadas durante o processo de aplicação do método de análise de risco. A redução do número de categorizações, inserção de cores e descrições objetivas e aderentes às obras civis foram aspectos facilitadores para equipe técnica realizar as classificações dos modos de falha.

Após a classificação dos modos de falha, o método FMEA indica o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR), através do produto da ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D). Todavia, segundo a bibliografia, os índices possuem o mesmo valor de grandeza, gerando NPR iguais mesmo com valores de índices de classificação distintos. Esse fato gerou a necessidade, durante a realização deste trabalho, de utilização de fatores de ponderação para os índices detecção e severidade, em função da importância de medidas de controle, assim como a afetação

de modos falha no desempenho da estrutura, impactos ou prejuízos e a necessidade de manutenção.

Em função da abordagem indutiva do método FMEA, não é possível relacionar diretamente os modos de falha com o estado limite último do empreendimento. Todavia, de modo a permitir a análise global da segurança, houve a inclusão do Índice Global de Impacto e da Categoria de Risco no método. Por meio desses índices, além da classificação dos modos de falha, houve a consideração do estado de conservação, características técnicas, dados no Plano de Segurança de Barragem e do impacto da ocorrência do estado limite último a jusante do barramento.

Algumas referências do método FMEA apresentam como resultado uma matriz de criticidade ou também chamada matriz de risco. Apesar de ser um resultado visualmente interessante, normalmente é uma matriz bidimensional e não incorpora a probabilidade de detecção – índice importante para análise de obras de engenharia. Por esse motivo, em busca da inclusão de todos os índices e de um diagnóstico objetivo do risco, foi incorporado um índice que permitiu a classificação do estudo de caso em uma tabela de análise do Risco Global de Impacto.

A tabela de classificação quanto ao Risco Global de Impacto permite categorizar os modos de falha em risco mínimo ao extremo, sendo o significado destas classificações observado pelo responsável técnico do empreendimento diretamente, evitando interpretação ou análises complexas do resultado.

Através de modificações efetuadas nas tabelas de classificação dos modos de falha, no cálculo do Número de Prioridade de Risco e na apresentação do resultado da análise de risco, assim como a combinação de dados do método LCI e da Política Nacional de Barragens, foi proposto um método de análise de risco denominado como Risco Global de Impacto (RGI).

O método de Árvore de Falhas (FTA) se mostrou, durante a realização deste trabalho, vantajoso para a engenharia de barragens, afinal considera inicialmente um estado limite último (evento de topo) para análise e na sequência identifica os eventos primários ou intermediários que contribuem com a efetivação do evento de topo.

A Árvore de Falhas é uma ferramenta gráfica, baseada em fluxograma, que permite a identificação do estado limite último, eventos que contribuem com a efetivação e o resultado da análise em uma única figura/imagem, aspecto facilitador para interpretação e análise do resultado pelo responsável técnico.

Com o intuito de consolidar o entendimento de análises de risco e em função da análise através do método RGI ter sido realizada por meio de uma abordagem qualitativa, a Árvore de Falhas foi realizada de modo semiquantitativo, ou seja, foram indicadas taxas (valores) de falha para os eventos primários.

O maior desafio de análises quantitativas, relacionadas à engenharia de barragens, consiste na obtenção de probabilidade de ocorrência de falhas/eventos. Em função deste aspecto, foi desenvolvida uma tabela com a probabilidade de ocorrência de eventos primários inspirada em dados bibliográficos do método FMEA. Essa tabela apresenta valores de probabilidade que são dados de entrada para um *software*, todavia, a classificação dos eventos pela equipe técnica foi realizada pela coluna “descrição” apresentada na tabela, fato que gerou a consideração do método como semiquantitativo.

Em Árvores de Falha o conceito de operadores lógicos tem influência direta de sistemas elétricos/mecânicos, designados para operação de sistemas em série e em paralelo, por esse motivo os operadores contribuem com a probabilidade de ocorrência do evento de topo na mesma proporção que as taxas de falha adotadas para os eventos primários. Portanto, em análises técnicas é importante a realização de testes de hipóteses com alteração de operadores e análise desta modificação na efetivação de eventos de topo.

A obtenção da probabilidade da efetivação do estado limite último de uma estrutura se mostrou um dado relevante para engenharia de barragem, todavia, o reduzido número de dados de taxas de probabilidade de ocorrência dos eventos e a elevada influência na escolha de operadores devem ser considerados na interpretação do resultado.

Os métodos FMEA e LCI apresentam carências quando aplicados em obras civis de engenharia, como: dúvidas relacionadas a consideração de anomalias ou estados limites últimos como modos de falha, tabelas de classificação direcionadas a sistemas elétricos e mecânicos, carências de tabelas para classificação de indicadores, caracterização do vale a jusante em etapas distintas, realização não obrigatória da Etapa 2 do método LCI, matriz bidimensional sem a consideração da classe de detecção e resultado não objetivo quanto ao risco envolvido no empreendimento.

Por meio do mapeamento de pontos positivos e carências dos métodos FMEA e LCI, através da aplicação em um empreendimento hidrelétrico, os métodos de

análise de risco foram combinados e personalizados. As modificações dos métodos contribuíram para a avaliação do risco do empreendimento, facilitando a aplicação pela equipe técnica responsável e reduzindo as dúvidas relacionadas as classificações e conclusões do risco envolvido no estudo de caso.

A principal carência do método FTA é relacionada as taxas de ocorrência dos eventos primários relacionados a obras civis de engenharia, sendo uma contribuição deste trabalho a realização de uma tabela com a ocorrência de eventos primários, relacionando as taxas com descrições aderentes às obras civis de engenharia. Essa tabela permitiu a inserção de taxas de ocorrência no *ITEM ToolKit Software*, cálculo da probabilidade de efetivação do evento de topo e a análise de grandezas de importância dos eventos primários adotados.

A proposição de um método de análise de risco permitiu a caracterização de um empreendimento e do vale a jusante, análise e classificação de modos de falha em classes de ocorrência, severidade e detecção, análise do Plano de Segurança de Barragem e classificação quanto ao potencial de perdas de vidas humanas e perdas econômicas em uma eventual possibilidade de ruptura.

De modo possibilitar a proposição de um método houve a necessidade de estudar e aplicar dois métodos qualitativos de análise de risco, permitindo identificar pontos positivos e negativos de cada um destes. Os pontos positivos foram aglutinados e personalizados para duas estruturas de um empreendimento hidrelétrico fictício baseado em uma obra real.

Os valores/pontos empregados na proposição do método são subjetivos e possuem a contribuição direta da experiência da Autora na classificação. Todavia, foram importantes para aplicação dos métodos e construção deste trabalho.

A utilização de um método de análise de risco distinto do LCI e FMEA auxiliou no processo de construção do trabalho, sendo adotado a Árvore de Falhas para complementar a análise de risco das estruturas do empreendimento. Este método utiliza uma abordagem vinculada a contribuição de eventos primários que colaboram para a ocorrência de um evento de topo (indesejável) através da ligação por operadores lógicos. Esse método permitiu clarificar eventos primários, eventos de topo, a ligação entre eles e a importância de cada um na efetivação de eventos indesejáveis.

A proposição, modificação e personalização de métodos permitiu consolidar parte do conhecimento na área de análises de risco e verificar a importância do tema

para a área de barragens. Este trabalho permitiu vincular métodos de análise de risco com ferramentas e acessórios utilizados por empreendedores no Brasil, permitindo efetuar a análise do risco de estruturas e ainda mapear eventos que podem ser mitigados para diminuir a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável. Este trabalho é uma contribuição para engenheiros e empreendedores na utilização destes métodos de análise de risco na avaliação de empreendimento similares.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Calibração e aplicação dos métodos em um número maior de empreendimentos;
- Aplicação dos métodos em outras estruturas como: barragem de terra e enrocamento, conduto, túnel, casa de força ou ainda, barragens relacionadas à área de mineração;
- Aplicação dos métodos em um estudo de caso de ruptura de barragem;
- Desenvolvimento de métodos para obtenção da probabilidade de ocorrência de eventos primários, relacionados à área da engenharia de barragens;
- Aplicação da Árvore de Falhas considerando o estado limite último geral do empreendimento, sendo provável a obtenção de uma análise complexa e extensa; e
- Automatização do método RGI, direcionando a planilha ou *software* para utilização exclusiva na engenharia de barragens.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **RESOLUÇÃO N° 236**. Documento nº 00000.005651/2017-42, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**. Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens (RSB)**. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. Brasília, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 696, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2015**.

ANTUNES, Nuno Miguel Canas. **Avaliação do risco em ativos físicos baseada numa metodologia Fuzzy-FMEA**. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2020.

ASSIS, A. P., FRANCISS, F. O., RABECHINI, R. **GESTÃO DE RISCOS: empreendimentos complexos**. Curitiba: CRV, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento. 2006.

ALMEIDA, A. B. **Gestão do risco e da incerteza. Conceitos e filosofia subjacente**. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, 2014.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (atualizada pela Lei nº 14.066, de 2020)**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

BROBERG, L.; THORWID, M. **Evaluation of failure modes for concrete dams**. KTH Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suécia, 2015.

BS 4778-3.1:1991. Quality vocabulary. Availability, reliability and maintainability terms. Guide to concepts and related definitions. 1991.

CAUCHICK, P. et al. **Metodologia científica para engenharia**. Elsevier, Brasil. 2019.

CHRYSLER CORPORATION; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS CORPORATION. **Potential Failure Modes and Effects Analysis (FMEA): Reference Manual**. 4th. ed.: AIAG, 2008.

COLLE, G. **Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança**. Curitiba, 2008.

CNPGB. **2º Relatório de Progresso**. Grupo de trabalho de análise de riscos em barragens. 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Considerações sobre a expansão hidrelétrica nos estudos de planejamento energético de longo prazo**. Rio de Janeiro, 2018.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003.

FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G. **Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA**. Gestão & Produção, v. 13, n. 2, p. 245-259, 2006.

FONSECA, M. N. E. **Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos: um evento de mineração no Brasil**. 2018.

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. **A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA**. International Journal of Production Research, v. 39, n. 13, p. 2991-3002, 2001.

FUSARO, T. C. **Módulo III: Gestão e desempenho de barragens**. Unidade 1: análise e gestão de riscos. Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011 – SICONV nº 756001/2011, firmado entre a Agência Nacional de Águas - ANA e a Fundação Parque Tecnológico de Itaipu - Brasil - FPTI. 2011.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GERSCOVICH, Denise MS. **Estabilidade de Taludes (2ª edição)**. Oficina de textos, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo - SP: Editora Atalas, 2002.

GONÇALVES, F. C. et al. **Desenvolvimento da abordagem multistakeholder para análise de árvore de falhas no setor terciário**. 2018.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. M., **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2009.

ITEM TookKit Version 9.5.2. ITEM SOFTWARE (USA) INC. Disponível em: https://itemsoft.com/item_toolkit.html. Acesso em: janeiro de 2021.

ISO 31000 Setting a New Standard for Risk Management. Risk Analysis, Vol. 30, N° 6, 2010.

JÓNATAS, R. J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogêneos**. Tese de Doutorado. Lisboa, 2013.

KOLIOS, A. J.; UMOFIA, A.; SHAFIEE, M. **Failure mode and effects analysis using a fuzzy-TOPSIS method: a case study of subsea control module**. International Journal of Multicriteria Decision Making, v. 7, n. 1, p. 29-53, 2017.

KABIR, S. **An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis**. Expert Systems with Applications, v. 77, p. 114-135, 2017.

KETZER, B.; SCHÄFFER, A. (2010). Roteiro de cálculo com auxílio de planilha eletrônica para análise de estabilidade em barragens de concreto por gravidade. Revista Da Graduação, v. 3 n. 1 (2010).

LIU, H. **FMEA using uncertainty theories and MCDM methods**. p. 13-27.2016. Springer, Singapore, 2016.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

MELO, A. V. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

MENEZES, C. A. G. **FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do número de prioridade de risco (RPN)**. Guaratinguetá, São Paulo, 2020.

PEDROSA, B. M. M. **Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2014.

PEREIRA, G. M. **Acidentes e rupturas de barragens de armazenamento de água**. São Paulo, ABGE, 2020.

PEREIRA, T. S. et al. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

PIMENTA, L. **Abordagens de riscos em barragens de aterro**. Doutorado em Engenharia Civil. Lisboa: LNEC, 2009.

Plano de Segurança de Barragem. **Plano de Ação de Emergência (PAE)**. Curitiba, 2019

Relatório visita técnica de inspeção ao empreendimento. Curitiba, 2019.

SAKURADA, E. Y. et al. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS, R. N. C. **Enquadramento das análises de riscos em geotecnia**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2006

SCAPIN, C. A. **Análise sistêmica de falhas**. Falconi Editora, 2013.

SILVA, Estefania Torres Gomes da et al. **Barragens hidrelétricas e desastres: uma avaliação de metodologias de gestão de risco ambiental**. Brasília, 2012.

Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Disponível em: www.snisb.gov.br. Acesso em maio de 2021.

SPANCOLD. COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS. **Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses**. Espanha, 2013.

TEOH, P. C.; CASE, K. **Failure modes and effects analysis through knowledge modelling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 153, p. 253-260, 2004.